

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**VARIABILIDADE ENTRE MATERIAIS GENÉTICOS DE *Eucalyptus* spp
QUANTO À DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS EM LATOSSOLOS
PROFUNDOS**

RAFAEL COSTA PINHEIRO

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal

BOTUCATU – SP

Novembro - 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**VARIABILIDADE ENTRE MATERIAIS GENÉTICOS DE *Eucalyptus* spp
QUANTO À DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS EM LATOSSOLOS
PROFUNDOS**

RAFAEL COSTA PINHEIRO

Orientador: Prof. Dr. Jean-Paul Laclau

Coorientador: Prof. Dr. Iraê Amaral Guerrini

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal

BOTUCATU – SP

Novembro – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP -
FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

P654v Pinheiro, Rafael Costa, 1988-
Variabilidade entre materiais genéticos de *Eucalyptus*
spp quanto à distribuição de raízes finas em Latossolos
profundos/ Rafael Costa Pinheiro. - Botucatu : [s.n.], 2014
xii, 81 f. : fots., grafs., ils., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014

Orientador: Jean-Paul Laclau

Coorientador: Iraê Amaral Guerrini

Inclui bibliografia

1. Eucalipto - Raízes. 2. Eucalipto - Melhoramento gené-
tico. 3. Análise foliar. 4. Desidratação (Hídrica). 5. La-
tossolos. I. Laclau, Jean-Paul. II. Guerrini, Iraê Amaral.
III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Fi-
lho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômi-
cas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: “VARIABILIDADE ENTRE MATERIAIS GENÉTICOS DE *Eucalyptus* spp
QUANTO À DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS EM LATOSSOLOS
PROFUNDOS”**

ALUNO: RAFAEL COSTA PINHEIRO

ORIENTADOR: PROF. DR. JEAN-PAUL LACLAU
COORIENTADOR: PROF. DR. IRAÊ AMARAL GUERRINI

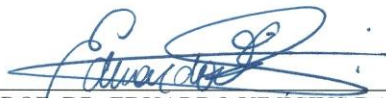
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JEAN-PAUL LACLAU



PROF. DR. CÁSSIO HAMILTON ABREU JUNIOR



PROF. DR. EDUARDO VINÍCIUS DA SILVA

Data da Realização: 13 de novembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Todo grande trabalho nunca é realizado com a participação de apenas uma pessoa e neste não foi diferente. A participação das mais variadas pessoas, tanto na esfera técnica, como na esfera pessoal, é decisiva para o desenvolvimento e consequente amadurecimento e finalização deste trabalho.

Gostaria de agradecer a Deus pela saúde, pela força e apoio nos momentos mais difíceis vividos, pela possibilidade de conviver com pessoas do bem e especiais durante todo esse trajeto.

Agradeço à minha família, que também sempre me deu forças, incentivou e ajudou perante todas as dificuldades que até então surgiram em minha vida. À minha mãe Sevane, um exemplo de pessoa solidária, humilde, atenciosa, dedicada, amorosa e lutadora, que sempre me conforta com suas palavras e é meu exemplo de vida. À minha avó Ivone, minha segunda mãe, que infelizmente veio a falecer recentemente, que me ensinou a ser uma pessoa mais perseverante, a viver com mais fé e mais alegria. À minha irmã Lívia, por sua atenção, apoio confidência e amizade. Ao meu pai José Fernando, que sempre me apoiou quando necessário e que infelizmente também faleceu esse ano, nos deixando boas lembranças de sua alegria de viver. Amo e sempre amarei todos vocês.

Agradeço muito à minha noiva Lívia Lanzi, a qual sempre me deu suporte em momentos difíceis, pela sua enorme compreensão, companheirismo, carinho e amor. Ademais, por suas ajudas na parte estatística deste trabalho. Te amo!

Ao restante de minha família (tios, tias e primos), à família de minha noiva (sogra, sogro, cunhadas, cunhados) e amigos de longa data, os quais sempre torceram, incentivaram e proporcionaram momentos felizes durante esta trajetória.

Agradeço à Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (ESALQ/USP), ao Rildo, Lorival, Elaine e demais funcionários, que sempre me receberam bem, transmitiram seus aprendizados, deram a oportunidade de fazer estágio curricular e consequentemente de desenvolver a pesquisa que deu origem a este trabalho.

Ao meu orientador Jean-Paul Laclau, que desde o início das atividades em Itatinga me transmitiu confiança, passou seus numerosos conhecimentos, foi paciente, presente, compreensível, dedicado e amigo em todos os momentos. Aos outros pesquisadores franceses do CIRAD, Jean-Pierre e Yann Nouvellon, sempre ajudando com suas sugestões e conhecimentos técnicos.

À FAPESP, pela concessão da bolsa de mestrado que resultou neste trabalho.

Às nove empresas florestais participantes e financiadoras do projeto Eucflux, juntamente com o CIRAD, Universidade da Carolina do Norte, Esalq/USP e IPEF.

Agradeço o suporte da FlorAgro, principalmente ao Eder, e também a seus funcionários e ex-funcionários (Dirlei, Gérson, Érick, Nando, Ronaldo, Ezequiel, Donizete, Fernanda, Kassiane, Bruna, etc), cujo enorme trabalho braçal e laboratorial foi essencial para a possibilidade de realizar este projeto, principalmente na difícil coleta das amostras de solo em profundidade.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), especificamente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela possibilidade de realizar um curso de pós-graduação gratuito e bem conceituado. Ao professor desta instituição, Dr. Iraê Amaral Guerrini, meu coorientador, pela amizade e pelo apoio, esclarecimentos, sugestões e ajuda com todos os eventos/compromissos envolvidos com a Universidade e com o projeto.

A todos os estagiários e amigos que, de maneira mais ou menos indireta, me auxiliaram, principalmente na parte laboratorial - lavagem de solo e separação de raízes finas - e me deram apoio, moradia, consolo e descontração ao longo deste trabalho e da vida em Itatinga e Botucatu: José Carlos de Deus Jr. e Karen (especialmente), Ivan, Daise, Cris, Elisa, George, Ranieri, Raoni, Mathias, Hadrien, Florence, Elodie, Magali, Romain, Charly, Bruno, Paloma, Marion, Lucas (Macarrão), Deivid, “Zé Butina”, Mateus, Raquel (Crisma), Marianne, Raoni (Cabeça), Vic, Gi, Rita e a outros que porventura eu não tenha citado.

Serei eternamente grato a todos vocês! Obrigado por tudo!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1. O desafio de trabalhar com raízes finas em camadas profundas do solo.....	9
2.2. Métodos diretos e indiretos para estudar raízes finas	10
2.3. O papel de raízes profundas no clima e na absorção de água e nutrientes do solo.....	11
2.4. Estudos sobre as características de raízes finas em ecossistemas florestais	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. O Projeto EUCFLUX.....	19
3.2. Caracterização da área de estudo e definição dos tratamentos	21
3.3. Delineamento experimental	26
3.3.1. Coleta aos 2 anos de idade do povoamento.....	26
3.3.2. Coleta aos 4 anos de idade do povoamento.....	27
3.4. Avaliações de biomassa, comprimento e área de raízes finas	29
3.4.1. Coleta em campo.....	29
3.4.2. Procedimentos laboratoriais	31
3.5. Avaliações de biomassa e área de folhas	33
3.5.1. Coleta em campo.....	33
3.5.2. Procedimentos laboratoriais	34
3.5.3. Área foliar dos povoamentos.....	34
3.6. Análise dos dados	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. Características das raízes finas dos quatro materiais genéticos de <i>Eucalyptus</i> aos 2 anos de idade	36
4.1.1. Relação entre a altura média das árvores e a profundidade máxima de raízes finas.....	36
4.1.2. Densidade das raízes finas (DRF).....	37
4.1.3. Relação entre o Índice de Área Foliar e o Índice de Área Radicular	40

4.1.4. Índice de área radicular (IAR).....	42
4.1.5. Características morfológicas das raízes finas.....	43
4.1.6. Massa de raízes finas total.....	47
4.2. Características das raízes finas do material genético de <i>Eucalyptus urograndis</i> (clone 8) aos 2 anos e 4 anos de idade	48
4.2.1. Relação entre a altura média das árvores e a profundidade máxima de raízes finas.....	48
4.2.2. Densidade das raízes finas (DRF)	49
4.2.3. Relação entre o Índice de Área Foliar e o Índice de Área Radicular	51
4.2.4. Índice de área radicular (IAR).....	52
4.2.5. Características morfológicas das raízes finas.....	54
4.2.6. Massa de raízes finas total.....	58
4.3. Características das raízes finas de dois materiais genéticos de <i>Eucalyptus urograndis</i> aos 4 anos de idade e em dois tipos de solo	59
4.3.1. Relação entre a altura média das árvores e a profundidade máxima de raízes finas.....	59
4.3.2. Densidade das raízes finas (DRF)	60
4.3.3. Relação entre o Índice de área foliar (IAF) e o Índice de área radicular (IAR).....	63
4.3.4. Índice de área radicular (IAR).....	65
4.3.5. Características morfológicas das raízes finas.....	66
4.3.6. Massa de raízes finas total.....	70
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
6. CONCLUSÕES.....	74
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1: Principais características do solo dos blocos utilizados no experimento até 14 metros de profundidade. Os desvios padrões são informados entre os parênteses (n=3).	23
Tabela 2: Empresa fornecedora e espécie de cada um dos materiais genéticos estudados.	25
Tabela 3: Profundidade máxima média (desvio padrão, n=3) encontrada para os quatro materiais genéticos de eucalipto aos dois anos de idade em solo de textura média/arenosa.	39
Tabela 4: Média e coeficiente de variação (C.V.) para a área radicular específica (ARE), o comprimento radicular específico (CRE) e o diâmetro médio (Di) de raízes finas para cada material genético estudado aos 2 anos de idade.	44
Tabela 5: Média e coeficiente de variação (C.V.) para a área radicular específica (ARE), o comprimento radicular específico (CRE) e o diâmetro médio (Di) de raízes finas para o clone 8 aos 2 e 4 anos de idade do povoamento.	55
Tabela 6: Média e coeficiente de variação (C.V.) para a área radicular específica (ARE), o comprimento radicular específico (CRE) e o diâmetro médio (Di) de raízes finas para cada material genético em cada tipo de solo (blocos 3 e 8) aos 4 anos de idade.	67

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1: Precipitação diária do período estudado no projeto Eucflux entre o plantio (01/12/2009) e a idade de 4 anos (dezembro de 2013).....	21
Figura 2: Área da Fazenda Americana contendo a torre de fluxo e os 10 blocos utilizados no projeto EUCFLUX, Itatinga – SP (Fonte: Projeto Eucflux, 2010).....	22
Figura 3: Exemplo de um bloco contendo 16 parcelas que representam 16 materiais genéticos diferentes de eucalipto no projeto EUCFLUX, Itatinga – SP (Fonte: Projeto Eucflux, 2010).	24
Figura 4: Tamanho da parcela e posição das amostras de solo dentro de cada parcela útil na amostragem realizada aos dois anos de idade.	27
Figura 5: Posições dos pontos de amostragem feitos de 0 – 1 metro para cada material genético em cada um dos blocos utilizados aos 4 anos de idade do povoamento.	28
Figura 6: Representação esquemática das três posições de amostragem do solo em cada bloco e em cada material aos 4 anos de idade, utilizando o trado semimecanizado, a partir de 1 m de profundidade. O andaime foi instalado entre as 4 árvores indicadas com um círculo cheio.....	29
Figura 7: Metodologia e equipamentos usados em campo para coletar as amostras de solo até o lençol freático (máximo de 17,5 m de profundidade aos 4 anos de idade): sonda cilíndrica para amostragem na superfície do solo (A); motor semimecanizado (B); equipe de coleta de campo realizando uma amostragem (C); retirada do torrão de terra do trado (D) – Projeto EUCFLUX (Fonte: Pinheiro, 2011, 2013).....	31
Figura 8: Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (em metros) para os quatro materiais genéticos estudados aos 2 anos de idade. As barras verticais representam os desvios padrões para altura média e profundidade máxima atingida pelas raízes finas dos tratamentos.....	37
Figura 9: Distribuição de raízes finas: (A) até a profundidade máxima encontrada para os quatro materiais genéticos estudados aos dois anos de idade. Valores médios para as quatro posições independentes estão indicados. Os teores de umidade do solo estão indicados até a profundidade de 13,50 m e a linha tracejada mostra os valores obtidos em 14/02/2010, durante a primeira estação chuvosa após o corte raso (B).....	38
Figura 10: Relação entre o Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Área Radicular (IAR). As duas marcas para cada material genético representam a média em cada uma das 2 parcelas amostradas aos 2 anos de idade. Dez (10) árvores foram amostradas destrutivamente para determinar a área foliar.....	41
Figura 11: Índice de área radicular ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) por camada de solo para cada material genético. As letras minúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os	

- materiais genéticos por camada de solo. As letras maiúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos considerando o total, ou seja, a soma de todas as camadas. 43
- Figura 12: Mudanças no comprimento radicular específico A), na área radicular específica B), e no diâmetro médio C) de raízes finas com a profundidade do solo para quatro materiais genéticos de *Eucalyptus* aos 2 anos de idade. 46
- Figura 13: Proporção da massa de raízes finas acumulada até a profundidade máxima atingida aos 2 anos de idade para quatro materiais genéticos de eucalipto.....47
- Figura 14: Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (metros) do clone M08 de *Eucalyptus urograndis* aos 2 e aos 4 anos de idade do povoamento no solo de textura média/arenosa. As barras representam os desvios padrões para altura média e profundidade máxima dos tratamentos. As raízes foram encontradas até o lençol freático do sítio estudado (15,3 metros de profundidade para este material aos 4 anos).....49
- Figura 15: Densidade média de raízes finas (g kg^{-1}) para o material genético de *E. urograndis* aos 2 e 4 anos de idade ao longo do perfil de solo com textura média/arenosa. Diferenças significativas entre os tratamentos ($P \leq 0,05$) são indicadas por *. 50
- Figura 16: Relação entre o índice de área radicular (IAR) e o índice de área foliar (IAF) para o clone de *Eucalyptus urograndis* (M08) aos 2 e aos 4 anos de idade do povoamento no solo arenoso. Aos 2 anos de idade, o ponto representa a média de 4 pontos de amostragem de raízes em diferentes posições e 10 árvores amostradas destrutivamente para determinar a área foliar. Aos 4 anos, o ponto representa a média de 3 pontos de amostragem em diferentes posições e 6 árvores amostradas destrutivamente para determinar a área foliar.....51
- Figura 17: Índice de área radicular ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) por camada de solo para o clone de *Eucalyptus urograndis* (M08) aos 2 e aos 4 anos de idade do povoamento no solo arenoso até 13 metros de profundidade. As letras minúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P < 0,05$) entre os materiais genéticos por camada de solo. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos considerando o total, ou seja, a soma de todas as camadas. 53
- Figura 18: Mudanças no comprimento radicular específico A), na área radicular específica B), e no diâmetro médio C) de raízes finas com a profundidade do solo para dois clones de *Eucalyptus urograndis* em solos com diferentes texturas aos 4 anos de idade. 57
- Figura 19: Proporção da massa de raízes finas acumulada até a profundidade máxima atingida pelo clone de *Eucalyptus urograndis* aos 2 e aos 4 anos de idade em solo de textura média/arenosa. 59
- Figura 20: Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (em metros) dos dois clones de *Eucalyptus urograndis* em solos com diferentes texturas aos 4

anos de idade. As barras verticais representam os desvios padrões para altura média e profundidade máxima atingida pelas raízes finas dos tratamentos.....	60
Figura 21: Densidade média de raízes finas (g kg^{-1}) dos materiais genéticos 8 e 12 até 17 metros de profundidade, em diferentes texturas de solo, aos 4 anos de idade. Diferenças significativas entre os tratamentos ($P \leq 0,05$) são indicadas por *.....	61
Figura 22: Teor de umidade gravimétrica do solo (%) para os dois clones de <i>E. urograndis</i> até 18 metros de profundidade, em dois tipos de solo, aos 4 anos de idade.	63
Figura 23: Relação entre o índice de área radicular (IAR) e o índice de área foliar (IAF) dos dois clones de <i>Eucalyptus urograndis</i> em solos com diferentes texturas aos 4 anos de idade do povoamento. Os pontos representam as médias de 3 pontos de amostragem de raízes em diferentes posições para cada material genético em cada tipo de solo e 6 árvores amostradas destrutivamente para determinar a área foliar.	64
Figura 24: Índice de área radicular ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) por camada de solo dos dois clones de <i>Eucalyptus urograndis</i> (M08 e M12) aos 4 anos de idade do povoamento, nos solos de textura argilosa e média/arenosa. As letras minúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos por camada de solo. As letras maiúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos considerando o total, ou seja, a soma de todas as camadas.	65
Figura 25: Mudanças no comprimento radicular específico A), na área radicular específica B), e no diâmetro médio C) das raízes finas com a profundidade do solo para dois materiais genéticos de <i>Eucalyptus urograndis</i> aos 4 anos de idade em diferentes tipos de solo.....	69
Figura 26: Proporção da massa de raízes finas acumulada até a profundidade máxima atingida aos 4 anos de idade para os dois clones de <i>Eucalyptus urograndis</i> (M08 e M12) nos solos de textura argilosa e média/arenosa.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AFE	Área foliar específica
ARE	Área radicular específica
C	Carbono
°C	Graus Celsius
Ca	Cálcio
CIRAD	La Recherche Agronomique pour le développement
CO ₂	Gás carbônico
Cm	Centímetro
CRE	Comprimento radicular específico
Di	Diâmetro médio
Dpi	Dots per Inch (Port.= pontos por polegada)
DRF	Densidade de raízes finas
<i>E.</i>	<i>Eucalyptus</i>
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
G	Grama
Há	Hectare
IAF	Índice de área foliar
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IAR	Índice de área radicular
IPEF	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
K	Potássio
Kg	Quilograma

Km	Quilômetro
L	Litro
M	Metro
Mm	Milímetro
N	Nitrogênio
NCSU	North Carolina State University
Rb	Rubídio
Sr	Estrôncio
USP	Universidade de São Paulo

VARIABILIDADE ENTRE MATERIAIS GENÉTICOS DE *Eucalyptus* spp QUANTO À DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES FINAS EM LATOSSOLOS PROFUNDOS

Autor: RAFAEL COSTA PINHEIRO

Orientador: JEAN-PAUL LACLAU

Coorientador: IRAÊ AMARAL GUERRINI

RESUMO

O comportamento de raízes em camadas profundas do solo é um assunto pouco estudado entre espécies arbóreas. Este tema pode ser importante para programas de melhoramento genético, pois um crescimento rápido das raízes em profundidade pode contribuir para explicar diferentes taxas de sobrevivência entre clones nos Latossolos profundos, em períodos excepcionalmente secos. Os objetivos do estudo foram: a) avaliar a densidade de raízes finas de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* aos 2 e 4 anos de idade e em solos com diferentes texturas; b) avaliar a razão entre o índice de área foliar (IAF) e o índice de área radicular (IAR) entre diferentes materiais genéticos de eucalipto; e c) avaliar se a relação entre a altura média do povoamento e a profundidade máxima atingida pelas raízes finas, já encontrada em uma monoprocedência de *E. grandis*, é válida para outros materiais genéticos. Para a coleta de raízes no solo, foi utilizado um trado semimecanizado que coletou amostras de solo a várias distâncias das árvores, até atingir 17 m de profundidade. As raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) e as folhas foram escaneadas e analisadas pelos softwares WinRhizo e ImageJ, respectivamente. A densidade de raízes finas entre os materiais genéticos estudados foi maior nas camadas superficiais do solo, atingindo valores de 0,2 a 0,4 g kg⁻¹, reduzindo-se a valores menores que 0,1 g kg⁻¹ abaixo da profundidade de 25 cm, independentemente do material genético. O material seminal e os clones exibiram um padrão similar no desenvolvimento de suas raízes finas em camadas profundas do solo. Entretanto, há uma tendência de maior densidade média de raízes finas para o material seminal e o clone 14 em comparação aos outros clones. Os perfis de conteúdo de água no solo mostraram que todos os materiais genéticos foram capazes de absorver água até 10 metros de profundidade aos dois anos de idade. De uma forma geral, aos 2 anos de idade o IAF teve uma grande variação entre

os materiais, sendo o menor de 2,8 (clone 16) e o maior de 3,9 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (clone 8). Já o IAR variou ainda mais entre os materiais, sendo o menor índice médio de 4,9 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (clone 8) e o maior de 9,3 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (clone 14). O clone 8 apresentou o maior IAF e o menor IAR, dados que permitem inferir que este material é capaz de manter uma área foliar alta com uma área radicular relativamente baixa. A relação altura/profundidade máxima foi válida apenas aos 2 anos de idade, visto que aos 4 anos de idade as raízes finas do material genético de eucalipto estudado nas duas idades já atingem o nível do lençol freático no solo (cerca de 16 m de profundidade), enquanto as árvores seguem crescendo em altura. Este estudo contribuiu para o melhor entendimento da dinâmica de raízes finas de diferentes materiais genéticos de eucalipto em Latossolos profundos, podendo ser útil em programas de melhoramento genético e na confecção de modelos ecofisiológicos. Em particular, a alta variabilidade da relação IAF/IAR entre os materiais genéticos estudados sugere que o enraizamento em camadas profundas do solo deve ser considerado em modelos que visam predizer o crescimento de plantios tropicais de eucalipto.

Palavras-chave: eucalipto, densidade de raízes finas, melhoramento genético, área foliar, déficit hídrico, camadas profundas do solo.

VARIABILITY IN FINE ROOTS DISTRIBUTION IN DEEP FERRALSOLS AMONG *Eucalyptus* spp GENETIC MATERIALS. Botucatu, 2014. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: RAFAEL COSTA PINHEIRO

Adviser: JEAN-PAUL LACLAU

Co-adviser: IRAÊ AMARAL GUERRINI

SUMMARY

Root behavior in deep soil layers is a subject poorly known for tree species. This topic can be important for breeding programs because a fast displacement of the root front is likely to explain different survival rates among clones in deep Ferralsols during exceptional drought periods. Although an inter-clonal variability in root development might account for different strategies to take up large amounts of water stored in deep soil layers after clearcutting, fine root distributions below a depth of 1 m have been poorly investigated for eucalypt clones. The objectives of our study were: a) to assess the inter-clonal variability among different *Eucalyptus* genetic materials in fine root densities down to the root front in 2 and 4-years-old clonal tests and in soils with different textures; b) to assess if the ratio between leaf area index (LAI) and root area index (RAI) was similar for different *Eucalyptus* genetic materials; and c) to assess if the relationship between mean stand height and maximum fine roots depth, as already found for a single *E. grandis* progeny, is similar for all genetic materials. Soils were sampled using a cylindrical auger at several distances from trees, down to a depth of 17 m for each genetic material. Fine roots (≤ 2 mm in diameter) and leaves were scanned and analysed by WinRhizo and ImageJ softwares, respectively. Fine root densities dropped from 0.2-0.4 g kg⁻¹ in the upper soil layer to values < 0.1 g kg⁻¹ below a depth of 25 cm, irrespective of the genetic material. Seedlings and clones exhibited a similar pattern of fine root development in very deep soil layers. However, mean fine root densities were higher for the seedlings and one clone (clone 14) than for the 2 other clones. Soil water content profiles showed that all the clones and seedlings had the capacity to withdraw water down to

10 meters of depth in the first 2 years after planting. In general, the LAI was highly variable between genetic materials. The lowest mean value was $2.8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 16) and the highest was $3.9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 8). RAI mean values ranged from $4.9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 8) to $9.3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 14) depending on the genetic material. Clone 8 had the highest LAI and the lowest RAI, which showed a strong capacity to maintain a high leaf area with a relatively low root area. Maximum height and maximum depth were roughly similar for the 4 genetic materials at 2 years after planting. At 4 years of age, the growth in depths of fine roots was stopped by the water table, while height growth was going on. This study contributed to a better understanding of fine root behavior of *Eucalyptus* genetic materials in deep Ferralsols, which might be helpful in breeding programs and for the development of ecophysiological models. In particular, the high variability of the LAI/RAI ratio among our 4 genetic materials suggests that deep rooting should be taken into account in process-based models aiming to predict the growth of tropical eucalypt plantations.

Keywords: eucalypt, fine roots density, breeding programs, leaf area, droughts, deep soil layers.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o gênero *Eucalyptus* representa 76,6% da área de florestas plantadas no Brasil, o que corresponde a 5.102.030 hectares, distribuídos em quase todo o território brasileiro, tendo uma maior concentração nos Estados de Minas Gerais (28,2%) e São Paulo (20,4%), além da Bahia, Mato Grosso do Sul e da região Sul; áreas onde se localizam as principais empresas do setor florestal brasileiro, tanto no segmento de papel e celulose, quanto no de painéis de madeira industrializada e siderurgia (ABRAF, 2013). A área plantada de tal gênero continua em pleno processo de expansão no país, porém em ritmo menos acelerado se comparado ao período de 2005-2009 (ABRAF, 2013). A produção primária bruta de plantações comerciais de *Eucalyptus* no Brasil é maior que $3500 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ de C, uma das mais altas do mundo para florestas (CABRAL et al., 2011; NOUVELLON et al., 2012).

O setor florestal brasileiro também tem uma contribuição cada vez maior para a economia do país e para sua sociedade de forma geral. Além de contribuir com uma parcela significativa da geração de produtos, tributos, empregos e renda, é estratégico no fornecimento de matéria-prima para que as indústrias nacionais do setor se desenvolvam. Em 2012, o Valor Bruto da Produção Florestal (VBPF) estimado para este setor foi de R\$56,26 bilhões, o que evidencia seu alto desempenho econômico. O segmento com maior contribuição neste cálculo foi o de celulose e papel, correspondendo a 53,7%. O setor florestal é responsável por aumentar a geração de empregos no país, tanto diretos quanto indiretos, tendo

uma demanda cada vez maior para seu cultivo, uso, produção e venda dos produtos oriundos dessas florestas (ABRAF, 2013).

Hoje, empresas florestais utilizam modelos ecofisiológicos para estimar a produção dos talhões e avaliar o potencial produtivo de novas áreas a serem adquiridas (ALMEIDA et al., 2004). Gradativamente, o sensoriamento remoto começa a ser usado operacionalmente por estas empresas, visando estimar a dinâmica de área foliar e a produção de biomassa ao longo da rotação florestal (LE MAIRE et al., 2010). Embora o desenvolvimento dos componentes aéreos das árvores seja muito estudado no Brasil, as características do seu sistema radicular são muito menos conhecidas. Contudo, informações sobre a localização das raízes finas no solo, ao longo do crescimento das árvores, podem influenciar na escolha de práticas silviculturais, tais como fertilização e mato-competição, a fim de otimizar a retirada de água e nutrientes pelo povoamento (LACLAU et al., 2001; 2010). Com a adaptação das práticas silviculturais aos riscos de perdas de nutrientes por lixiviação profunda, torna-se possível a redução de gastos com insumos e mão-de-obra por parte das empresas e até mesmo de pequenos produtores, fator de extrema importância do ponto de vista econômico e ambiental.

A profundidade de enraizamento máximo nos ecossistemas florestais é maior nas regiões equatoriais do que em regiões boreais (JACKSON et al., 1997). Árvores com raízes finas profundas têm sido encontradas em muitas regiões tropicais no mundo e estas raízes podem ter uma função essencial no fornecimento de água para a planta durante períodos de seca severa (NEPSTAD et al., 1994; SALESKA et al., 2007; CHRISTINA et al., 2011; MENDHAM et al., 2011). Além da aquisição de água e nutrientes, Magnani et al. (2002) mostraram que raízes finas são importantes também para o equilíbrio funcional entre área foliar e uso da água, inferindo que há um equilíbrio funcional entre raízes finas e área foliar. Somado a isso, a influência da idade da floresta na morfologia de raízes finas e as relações entre as características destas raízes e folhas são pouco estudadas (ROSENVALD et al., 2013).

Os solos profundos explorados por florestas com enraizamento profundo são reconhecidos por serem grandes componentes do ecossistema, com implicações ecológicas importantes (NEPSTAD et al., 1994). A profundidade radicular e a distribuição das

raízes definem o volume de solo que as plantas podem, potencialmente, explorar para extrair água e nutrientes. Essas características são importantes em ambientes com secas sazonais, pois elas permitem à floresta ter acesso à água armazenada em solos profundos durante períodos de seca, mantendo, portanto, a transpiração (MA et al., 2013). Schenk e Jackson (2002) levantaram a hipótese de que raízes profundas seriam mais encontradas em ecossistemas com limitação de água. Porém, ainda não foi esclarecido como e até que ponto a água, em solo profundo acessível, é usada pelas raízes. Responder a estas questões pode ajudar na compreensão da significância funcional de raízes profundas e sua contribuição para o consumo de água da planta em regiões semiáridas (MA et al., 2013).

Dentro de todo esse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi de avaliar se o desenvolvimento em profundidade das raízes de *Eucalyptus* e a relação entre a área dessas raízes e a área foliar seguem ou não um padrão geral para várias espécies. Além disso, foram objetivos mais específicos:

- Comparar a distribuição das densidades das raízes finas de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* ao longo do perfil do solo, aos 2 e 4 anos de idade;
- Relacionar a área foliar com a área de raízes finas para cada um dos materiais genéticos, verificando se há uma relação estável entre as várias espécies de eucaliptos usadas em plantações comerciais no Brasil;
- Avaliar se a correlação entre a altura média do povoamento e a profundidade máxima de raízes finas encontrada para uma monoprocedência de sementes, como visto por Christina et al. (2011), é válida para outros materiais genéticos;
- Verificar se as distribuições de raízes finas mudam com a idade das árvores;
- Comparar o desenvolvimento do sistema de raízes finas entre dois materiais genéticos de *Eucalyptus urograndis* em solos com diferentes texturas aos 4 anos de idade.

As hipóteses deste trabalho foram: (1) a profundidade máxima alcançada pelas raízes de *Eucalyptus* difere entre materiais genéticos; (2) a relação entre o índice de área foliar e o índice de área radicular possui uma alta variabilidade entre

diferentes materiais genéticos; (3) há uma correlação positiva entre a altura média do povoamento e a profundidade máxima de raízes finas, considerando diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus*; (4) o comprimento radicular específico e a área radicular específica diminuem com a idade do povoamento, enquanto o diâmetro médio aumenta; (5) a densidade de raízes finas é diferente em solos com diferentes texturas e aumenta com a idade da árvore.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O desafio de trabalhar com raízes finas em camadas profundas do solo

A dinâmica de raízes em camadas muito profundas do solo, principalmente abaixo de cinco metros de profundidade, é um assunto pouco estudado em espécies arbóreas de regiões tropicais (JACKSON et al., 1997; AL ALFAS et al., 2008; CHRISTINA et al., 2011; LACLAU et al., 2013; MA et al., 2013; MAEGHT et al., 2013), fazendo com que a relação entre as raízes e o perfil de água no solo permaneça inadequada (MA et al., 2013). Este tema pode ser de extrema importância para programas de melhoramento genético na eucaliptocultura, podendo ser uma estratégia que contribua para explicar diferentes taxas de sobrevivência entre clones em períodos excepcionalmente secos. Com um desenvolvimento radicular mais profundo, estes clones passam a ter acesso a uma reserva de água maior no solo se comparados a clones com desenvolvimento radicular mais superficial.

Estudos em processo do ecossistema ocorrentes abaixo do solo são relativamente raros comparados àqueles tratos de partes da planta acima do solo. Com as raízes e a rizosfera estando "escondidos" no solo, sua observação e estudo dependem da disposição de metodologias especiais que geralmente consomem bastante tempo, são frequentemente caras, difíceis e usualmente menos precisas (MAEGHT et al., 2013). Mesmo que metodologias para estudar os processos abaixo do solo tenham melhorado e o número de trabalhos remetendo a raízes tenha aumentado nas últimas décadas, estudos sobre raízes permanecem, em sua maioria, confinados aos horizontes mais superficiais do solo (PERSON, 1990; VOGT et al., 1998; MAEGHT et al., 2013).

A ampla dependência das raízes finas de uma variedade de fatores abióticos e bióticos, bem como da composição do solo e de sua profundidade torna a análise desse compartimento subterrâneo ainda mais difícil (AL ALFAS et al., 2008).

Informações sobre a atual importância das raízes profundas em termos de funcionamento da planta e de um ecossistema, dos ciclos hidrológicos (global) e bioquímicos continuam escassas. Essa situação parece estar relacionada a dois fatores principais: 1) limitações tecnológicas e econômicas, isto é, a ausência de ferramentas para medir raízes com rendimento suficiente e padronização de custos acessíveis; e 2) a suposição difundida de que raízes são componentes bastante marginais das plantas (MAEGHT et al., 2013).

Mesmo que raízes profundas possam, na maioria dos casos, representar uma fração relativamente pequena do total da biomassa do sistema radicular, elas provavelmente realizam muito mais funções essenciais do que geralmente é aceito (AL ALFAS et al., 2008; MAEGHT et al., 2013). Um número de estudos crescentes indica claramente que "procurar mais profundamente" é essencial não só para aumentar nosso entendimento da ecofisiologia da planta, mas também da ecologia da comunidade e ciclos geoquímicos (MAEGHT et al., 2013).

Poucos estudos abordam como as características radiculares estão relacionadas à produtividade da planta e estratégias de crescimento, sendo que a maior parte destes se dá com mudas ou plantas herbáceas em experimentos conduzidos em estufa (HAJEK et al., 2013).

2.2. Métodos diretos e indiretos para estudar raízes finas

Em seu estudo teórico sobre como estudar raízes finas, Maeght et al. (2013) citam quatro grupos de metodologias para estudá-las direta e visualmente: (i) escavações, trincheiras e perfurações (tradagem); (ii) métodos não destrutivos, como rhizotrons e minirhizotrons; (iii) trincheiras profundas; (iv) cavernas e minas.

Apesar dos avanços nos estudos de raízes nas últimas cinco décadas, os métodos mais comuns usados para obter dados de distribuição e estrutura de raízes não mudaram substancialmente: as técnicas de escavação e perfuração ainda são de longe os métodos preferidos (SCHENK e JACKSON, 2002; MAEGHT et al., 2013). Métodos de

escavação incluem escavação manual e de enraizamento, o uso de vários dispositivos mecânicos, explosivos e alta pressão de água ou ar (MAEGHT et al., 2013). Várias outras técnicas têm sido utilizadas, mas os resultados não foram baseados em amostras reais, efetivas (SCHENK e JACKSON, 2002).

No caso do método das perfurações via trado, Maeght et al. (2013) citam que suas principais vantagens são: informação vertical (biomassa de raízes finas); as amostras de raízes podem ser analisadas posteriormente à coleta (como por exemplo para morfologia radicular); facilidade para fazer repetições em solos sem pedras e menor perturbação na parcela. As principais desvantagens apontadas foram: a necessidade de uma grande quantidade de amostras, uma lavagem trabalhosa e moderadamente destrutiva e a dificuldade na logística, nos casos de uso de máquina perfuradora.

2.3. O papel de raízes profundas no clima e na absorção de água e nutrientes do solo

A profundidade de enraizamento é referida usualmente como a profundidade de enraizamento máxima, que determina a quantidade máxima de água que pode ser adquirida do solo durante a transpiração (MA et al., 2013). Zhang et al. (2011) relataram que a profundidade de água do solo usada pelas raízes aumentam gradualmente com a idade do povoamento, enquanto Ma et al. (2013) mostraram que a profundidade de enraizamento máxima geralmente aumenta com a idade do povoamento, mas isso estende-se rapidamente em povoamentos mais jovens e mais lentamente em povoamentos mais velhos.

A absorção de água é uma das funções chave dos sistemas radiculares profundos, especialmente em ambientes mais secos e pedregosos (MAEGHT et al., 2013). O armazenamento de água em leitos de rocha firme também pode ser de importância global: plantas sujeitas a déficits de umidade de solo poderiam continuar expandindo seus sistemas radiculares em leitos de rocha firme encharcados (SCHWINNING, 2010). De acordo com Nepstad et al. (1994), florestas perenifólias do nordeste do Pará na Amazônia brasileira mantêm sua transpiração durante os 5 meses mais secos, absorvendo água do solo a profundidades maiores que 8 metros.

Em uma perspectiva mais ampla, o impacto das raízes profundas nos ciclos hidrológicos poderia influenciar indiretamente climas regionais. Kleidon e Heimann (2000) concluíram que a vegetação com raízes profundas é uma parte importante do sistema

climático tropical e que, sem considerar raízes profundas, o clima superficial da Terra não pode ser simulado adequadamente. Ou seja, as raízes profundas possuem um papel crucial na absorção de água pela planta, na disponibilidade de água no solo e no ciclo da água em várias escalas, desde a rizosfera até as bacias hidrográficas inteiras.

Estudos de modelagem têm mostrado que o atual clima amazônico é dependente de quantidades consideráveis de água extraídas por árvores em camadas muito profundas do solo e transpiradas de volta à atmosfera durante períodos secos (SALESKA et al., 2007). Laclau et al. (2013) citam que a capacidade das árvores de absorver água de camadas profundas do solo durante períodos de seca pode influenciar no sequestro de C em florestas tropicais.

Matamala e Stover (2013) questionam: qual o nível de confiança poder-se-ia ter, em previsões futuras, se mecanismos abaixo do solo não são explicitamente parametrizados em modelos, particularmente frente a mudanças ambientais que podem afetar ambientes aéreos e subterrâneos de forma diferente? Se a funcionalidade radicular for incorporada aos modelos, isso acrescentaria, pelo menos, mais realismo e poderia aumentar simulações e capacidades preditivas em um mundo em transformação.

Novas metodologias e novos modelos são necessários para observar e compreender as funções do sistema radicular (MATAMALA e STOVER, 2013). Iversen (2010) deu evidências de que sem uma melhor representação e parametrização da distribuição de raízes no perfil do solo e sua influência por vários fatores, o ciclo de carbono do ecossistema não será capturado com precisão nos modelos, propondo uma série de mudanças de metodologias e de modelos para melhorar a representação da distribuição das raízes em profundidade.

A exploração do solo pelas raízes finas nos plantios tropicais de eucalipto ao longo da rotação é bem adequada para prevenir perda de água e nutrientes por drenagem profunda (LACLAU et al., 2010, 2013). O papel funcional de raízes profundas nessas plantações tem sido confirmado por abordagens de modelagem, que mostram que as previsões de produção são aumentadas quando o armazenamento de água em camadas muito profundas do solo é considerado (MENDHAM et al., 2011; MARSDEN et al., 2013).

A maior parte da absorção de água e nutrientes no solo em plantações de eucaliptos é realizada por raízes finas com diâmetro inferior a 1 mm (LACLAU et al.,

2012; O'GRADY et al., 2005). Esta estratégia dos eucaliptos é efetiva para maximizar a capacidade de adquirir recursos no solo em relação ao investimento em carbono e, provavelmente, contribui para maximizar a captura de recursos e as taxas de crescimento (O'GRADY et al., 2005).

Segundo Ma et al. (2013), a prática de irrigação por gotejamento pode inibir o crescimento radicular descendente (para baixo), reduzir a taxa de esgotamento de água profunda no solo e até prevenir a formação de uma camada seca de solo em profundidade.

2.4. Estudos sobre as características de raízes finas em ecossistemas florestais

Em um estudo das raízes profundas de eucalipto em solo arenoso no Congo, Laclau et al. (2001) verificaram que um alto grau de hidrofobia na superfície do solo pode contribuir para que haja canais de drenagem no solo. A habilidade das raízes finas de *Eucalyptus* para se concentrarem nessas áreas pode explicar a rápida retirada de nutrientes observada nas soluções do solo, as quais poderiam ajudar a reduzir as perdas de nutrientes causadas por uma drenagem profunda. Essa distribuição de raízes pode favorecer uma maior produção de madeira em solos pobres em nutrientes.

As raízes finas de um povoamento de *E. grandis* aos seis anos de idade foram estudadas por Silva et al. (2011) na região de Itatinga – SP. Os resultados encontrados permitiram inferir que as raízes finas de *E. grandis* exibiram diferentes comportamentos em relação às taxas de retirada de nitrogênio, potássio e cálcio, de acordo com a profundidade do solo. Este estudo mostrou uma especialização funcional das raízes em função da profundidade no solo, com uma maior capacidade de absorver Sr^{2+} e Rb^{+} (análogos de Ca^{2+} e K^{+} , respectivamente) nas soluções do solo para um mesmo comprimento das raízes finas a 3 metros de profundidade em comparação à superfície. Este comportamento pode contribuir para evitar perdas de potássio por lixiviação profunda caso a adubação seja concentrada no início da rotação (SILVA et al., 2011).

Um melhor conhecimento da dinâmica das raízes finas e do controle ambiental sobre o crescimento do sistema radicular é essencial para o manejo florestal e para melhorar a eficiência da fertilização e da irrigação em plantações florestais (THONGO M'BOU et al., 2008). Em um trabalho desses autores, utilizando rhizotrons para estudar o

crescimento das raízes finas (até 2 mm de diâmetro) em 2 povoamentos de *Eucalyptus* no Congo, foi observado que as taxas de alongamento das raízes finas exibiram uma variação sazonal nos dois povoamentos, com maiores taxas durante a estação chuvosa do que na estação mais seca, confirmando a hipótese do trabalho. Além disso, viram que a taxa de alongamento das raízes finas possuiu correlações positivas e significativas com o conteúdo de água no solo em todas as profundidades estudadas.

As características subterrâneas de cinco clones de *Populus*, pertencentes a diferentes espécies, foram estudadas por Al Alfes et al. (2008), na terceira rotação de uma cultura de talhadia de alta densidade instalada na Bélgica. As amostragens foram realizadas apenas na superfície do solo, mais especificamente entre 0 e 30 cm de profundidade. Os autores encontraram diferenças significativas na biomassa de raízes finas entre os clones e as camadas do solo e observaram que a camada mais superficial do solo (0 – 5 cm) foi muito rica em raízes finas. Além disso, constataram que a biomassa de raízes finas e sua distribuição para todos os clones diminuíram com o aumento da profundidade do solo e o IAR também variou entre os clones estudados.

Ostonen et al. (2007) citam que o comprimento radicular específico é provavelmente o parâmetro morfológico mais frequentemente medido em raízes finas, pois acredita-se que ele caracteriza aspectos econômicos do sistema radicular e serve como um indicador de mudanças ambientais, principalmente em condições experimentais, quando a disponibilidade de nutrientes é manipulada. Em seu trabalho mencionam que o CRE (razão entre o comprimento e a massa de raízes finas) é bastante dependente das classes de raízes finas e também das espécies de árvores, sendo significativamente maior nas árvores decíduas do que nas coníferas.

Raízes com maior comprimento e desenvolvimento superficial por biomassa, com alto CRE e alta ARE (razão entre a área e a massa de raízes finas) podem explorar volumes de solo maiores de maneira mais eficiente e, tipicamente, ter uma maior taxa de absorção de recursos por unidade de massa de raiz produzida do que raízes com menor CRE e/ou ARE. Uma maior área (ou comprimento) por massa pode ser atingida quer pela redução da densidade do tecido radicular, e/ou pela diminuição dos diâmetros radiculares.

Tem sido encontrado que a vida útil das raízes aumenta com o aumento crescente da densidade do tecido radicular, diminuição da ARE e menor concentração de N nas raízes de maneira similar às características da vida útil das folhas, da área foliar específica (AFE) e da concentração de nitrogênio foliar (HAJEK et al, 2013).

Estudando uma cronossequência de *E. grandis* na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga – SP, Maurice et al. (2010) encontraram uma diminuição no CRE de 28 a 68 meses, após o plantio nos povoamentos da cronossequência, mostrando que as características das raízes finas mudam ao longo do desenvolvimento do povoamento. Esse padrão foi mais pronunciado na profundidade de 10 cm do que nas camadas do solo mais profundas e uma tendência ascendente geral para o CRE com a profundidade do solo foi observada no fim da rotação.

Foram encontradas fortes correlações entre o crescimento em um povoamento de *E. globulus* (biomassa e área foliar) e a capacidade de captura de recursos (biomassa e área de raízes finas) (O'GRADY et al., 2006). Além disso, no mesmo estudo, uma forte relação entre a biomassa de raízes finas e a altura da árvore também foi encontrada. Contudo, essas análises e seus resultados foram encontrados baseados em um povoamento com 14 meses de idade, e com a coleta de raízes finas até, somente, um metro de profundidade.

Ainda considerando a relação entre a biomassa aérea e a biomassa subterrânea, Misra et al. (1998), estudando uma população de *Eucalyptus nitens* dos 10 aos 34 meses de idade, demonstraram que houve uma forte correlação linear entre a biomassa de raízes de uma árvore e sua biomassa aérea; resultado similar ao encontrado por Resh et al. (2003), porém em um povoamento de *E. globulus* na Tasmânia, aos 12 anos de idade.

Em seu trabalho com os diferentes clones de *Populus*, Al Alfes et al. (2008) inferiram que a ausência de uma correlação significativa entre as características das raízes finas e a biomassa aérea levam à conclusão de que a biomassa aérea não é um indicador confiável da biomassa subterrânea no álamo (*Populus*), provavelmente por causa da idade da plantação neste estudo (idade do toco de 10 anos). Porém, o índice de área radicular foi positivamente correlacionado com o índice de área foliar para todos os clones e em todas as

profundidades do solo, ou seja, clones com um alto IAR também possuíram um alto IAF, o que faz com que o IAF possa ser um indicador da área radicular.

Mudas seminais de eucalipto plantadas em solos sem impedimentos para o desenvolvimento radicular estão propensas a exibir um crescimento muito rápido de suas raízes em profundidade. As raízes mais profundas em povoamentos de seis meses até seis anos de idade foram encontradas a uma profundidade que corresponde em torno de 85% da altura média de povoamentos de *Eucalyptus grandis* seminais plantados no sudeste brasileiro (CHRISTINA et al., 2011). Para empresas com plantios comerciais, a profundidade máxima atingida pelas raízes pode ser de extrema relevância para a seleção de um determinado material genético a ser plantado em uma condição ambiental específica. A estabilidade da relação entre a profundidade máxima atingida pelas raízes e a altura média do povoamento deverá ser avaliada para outros materiais genéticos plantados comercialmente em regiões de clima diferente no Brasil. Essas informações podem ser úteis na modelagem da distribuição de raízes finas no solo e, assim, melhorar a capacidade de previsão da produção dos modelos ecofisiológicos usados atualmente pelas empresas.

No estudo em plantações de *E. grandis* com diferentes idades, Maurice et al. (2010) constataram que a isotropia das raízes finas foi pouco influenciada pela localização espacial no solo independentemente da idade do povoamento. A amostragem até 2,90 metros de profundidade possibilitou verificar que o desenvolvimento tridimensional das raízes finas em camadas muito profundas do solo foi similar ao observado na superfície do solo. Tal característica é importante para as plantações de eucaliptos estabelecerem-se em solos profundos, pois raízes finas podem ser encontradas a mais de 10 metros de profundidade em plantios de até sete anos (ROBINSON et al., 2006). A densidade de raízes finas diminui bastante em camadas do solo mais profundas, porém estas raízes ainda podem fornecer uma proporção significativa de água necessária para o desenvolvimento das árvores.

O mesmo resultado foi encontrado por Christina et al. (2011), que enfatizaram que as raízes de eucalipto fornecem acesso a grandes quantidades de água estocada em camadas muito profundas do solo durante a estação chuvosa (árvores de *E. grandis* com 3 anos e meio de idade absorveram água a uma profundidade de 10 m). O rápido

desenvolvimento da área foliar em plantações de eucalipto após o plantio conduz a uma evapotranspiração significativa a partir de aproximadamente um ano de idade, e a forte demanda evaporativa associada a uma exploração muito profunda do solo pelas raízes pode contribuir para reduzir a recarga dos lençóis freáticos (CHRISTINA et al., 2011).

Ma et al. (2013) estudaram o efeito da irrigação por gotejamento na distribuição de raízes finas de jujuba (*Ziziphus jujube*) em uma região semiárida (primeiro trabalho sobre raízes profundas da espécie). Os autores constataram que a profundidade máxima de raízes finas (até 2 mm de diâmetro) aumenta com a idade do povoamento e estende-se no solo rapidamente durante os primeiros 4 anos, porém mais lentamente nos 4 anos subsequentes. A profundidade máxima atingida pelas raízes foi de 5 m em uma plantação irrigada de jujuba com 9 anos, porém estabilizou-se e não aumentou depois disso. Entretanto, a profundidade atingiu 10 m em uma plantação de jujuba com 12 anos sem irrigação. Assim, a conclusão de seu trabalho foi que um baixo volume de irrigação reduziu a profundidade máxima de raízes na jujuba e impediu o esgotamento da água em camadas profundas do solo, ou seja, as raízes das plantas dessa espécie podem ajustar sua profundidade no solo dependendo do fornecimento de água superficial, podendo garantir o desenvolvimento sustentável de florestas artificiais.

Trabalhando com a dinâmica de raízes finas até 10 metros de profundidade em uma rotação completa de plantações de *E. grandis* em Itatinga-SP, Laclau et al. (2013) concluíram que há uma exploração do solo muito rápida por raízes finas até a profundidade estudada e que toda a água disponível que estava armazenada a uma profundidade de 6 – 7 m após o corte raso foi absorvida pelas árvores durante o primeiro ano após o plantio. A alta densidade de raízes finas (DRF) nos primeiros 3 m do solo e a presença de raízes finas em camadas muito profundas tornou possível prevenir a perda de água por drenagem profunda após o fechamento da copa. Esses resultados sugerem que o papel funcional das raízes profundas não tem sido suficientemente considerado por gestores florestais. A capacidade de armazenamento de água no solo a uma profundidade superior a 10 m é um importante critério para selecionar a terra mais adequada para o reflorestamento e para melhorar as predições de produção de biomassa por modelos baseados em processos (LACLAU et al., 2013). Os autores ainda frisam que mais estudos sobre as características

anatômicas, de arquitetura e funcionais das raízes finas ao longo de perfis de solos muito profundos deveriam ser implementados, a fim de se obter um maior conhecimento acerca do seu potencial impacto nos ciclos de carbono, água e nutrientes em regiões tropicais.

Em um estudo avaliando a densidade de raízes finas em função da profundidade de solos com diferentes texturas, realizado na cidade de Itatinga-SP, na mesma área experimental deste trabalho (Projeto Eucflux), Lambais et al. (2012) verificaram que o solo de textura arenosa possui uma maior densidade de raízes finas em relação ao solo com textura argilosa, principalmente nas camadas superficiais (0 – 1 m), encontrando valores médios de 0,58 e 0,13 g kg⁻¹, respectivamente. Já a densidade de raízes finas de 1 – 7 m de profundidade sofreu pouca variação em ambos os tipos de solo, possuindo alguns picos de aumento no solo de textura arenosa. Além disso, mostraram que foram encontradas raízes finas (≤ 2 mm) até 10 m de profundidade aos 2 anos de idade nos dois tipos de solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. O Projeto EUCFLUX

O trabalho foi conduzido em uma área experimental do projeto EUCFLUX (“Quantificação dos balanços de carbono, água e nutrientes, na escala do ecossistema, para uma rotação do eucalipto usando Torre de Fluxo – Testar Modelos Ecofisiológicos e Melhorar as Práticas silviculturais”) (STAPE et al., 2005), parceria entre IPEF, ESALQ/USP, IAG/USP, FCA/UNESP, CIRAD (França), NCSU (EUA) e nove empresas do setor florestal (Duratex, ArcellorMittal, Cenibra, Copener, Fibria, Suzano, Klabin, V&M Florestal e International Paper). Esse projeto visa estimar os balanços de energia, carbono, água e nutrientes para uma rotação completa do eucalipto. A vegetação anterior era composta por uma outra floresta plantada de eucalipto.

Em dezembro de 2009, um plantio de 16 diferentes materiais genéticos do gênero *Eucalyptus* foi repetido em 10 blocos, cobrindo um gradiente de produtividade no projeto EUCFLUX para a realização de diversos estudos. O projeto está instalado na Fazenda Americana, propriedade da empresa Duratex S.A. Tal área localiza-se no município de Itatinga, km 233 da Rodovia Castello Branco, porção central do Estado de São Paulo (22°58'04"S, 48°43'40"W), região sudeste brasileira, estando a aproximadamente 20 km da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga – Esalq/USP (SILVA et al., 2011; CAMPOE et al., 2013).

Um mês antes do plantio destinado ao projeto EUCFLUX, realizou-se a operação de combate à formiga pré-corte de forma manual, com dosador de isca, aplicando-se 4,75 kg ha⁻¹ de isca sulfuramida. Após o corte raso e a remoção da madeira da rotação

anterior, foi feito o processo de calagem do solo, utilizando-se um trator de 110 HP – BM 110 com uma calcareadeira, aplicando-se cerca de 4 toneladas de calcário por hectare.

Em relação às operações de preparo do solo para o processo de subsolagem foi utilizado um trator 140 HP com um subsolador de arraste, de 1 haste com ponteiro, a uma profundidade de 45 – 50 cm, com a aplicação conjugada de herbicida Glisolate na dose de $2,34 \text{ kg ha}^{-1}$. A quantidade total de nutrientes aplicada na rotação inteira (adubações de base e de cobertura) foi de 80 kg ha^{-1} de N, 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 , 284 kg ha^{-1} de K_2O , 76 kg ha^{-1} de enxofre (S), $5,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de boro (B), $3,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de zinco (Zn) e $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de cobre (Cu). Para a adubação de base, utilizou-se um trator 110 HP com adubador hidráulico com deslocamento de adubo por esteira. O adubo foi posicionado a 10 cm de profundidade e foram aplicados 301 kg ha^{-1} , sendo feita também uma aplicação conjugada de herbicida pré-emergente Solara (sulfentazone) de $1,18 \text{ L ha}^{-1}$. A proporção na adubação de base foi de $6 - 30 - 10 + 0,5\% \text{ Zn} + 0,5\% \text{ Cu}$.

O plantio foi feito com plantadeira manual (rendimento de 11,5 horas ha^{-1}), espaçamento 3 m x 2 m. O replantio foi realizado após um mês, com índice de 7,9%. Utilizando um trator 110 HP com carreta de aço galvanizado, realizou-se uma irrigação com consumo de 4,6 L por muda. Com relação ao repasse às formigas, foram feitas duas aplicações no período de 60 dias após o plantio, com uma dose de $1,29 \text{ kg ha}^{-1}$ de isca sulfuramida.

A primeira capina química manual foi realizada com o uso de bombas costais com capacidade de 16 L em área total (dose de $2,63 \text{ L ha}^{-1}$ de glifosato), 60 dias após o plantio, a fim de eliminar a brotação de eucalipto, sendo a aplicação localizada na inserção da brota. A segunda capina química manual foi realizada 4 meses após a primeira, antes da 1ª adubação de cobertura. Foi aplicada uma dose de $2,01 \text{ L ha}^{-1}$ de glifosato em área total, com o apoio de trator com carreta de inox para o transporte de calda herbicida.

Adubações de cobertura foram realizadas aos 6, 12 e 18 meses de idade. As doses totais e as proporções utilizadas foram as seguintes: a) 1ª adubação de cobertura (6 meses): dose total de 240 kg ha^{-1} e proporção $13 - 00 - 15 + 0,5\% \text{ B} + 0,8\% \text{ Zn}$; b) 2ª adubação de cobertura (12 meses): dose total de 280 kg ha^{-1} e proporção $11 - 00 - 24 + 0,5\% \text{ B}$; c) 3ª adubação de cobertura (18 meses): dose total de 280 kg ha^{-1} e proporção $00 - 00 - 54 + 1,0\% \text{ B}$.

3.2. Caracterização da área de estudo e definição dos tratamentos

A precipitação média anual ao longo dos últimos 15 anos anteriores a esse estudo foi de 1360 mm e a temperatura média anual foi de 19°C, com um período sazonal frio e seco de junho a setembro, cuja temperatura média foi de 17,2°C e a precipitação acumulada de 225 mm. O relevo é típico do planalto ocidental de São Paulo, com uma topografia suavemente ondulada (MAURICE et al., 2010; SILVA et al., 2011; LACLAU et al., 2013). A Figura 1 mostra os índices de precipitação diária mensurados desde dezembro de 2009, quando foi instalado o projeto Eucflux, até dezembro de 2013, mês em que foram feitas as últimas amostragens de solo deste projeto, aos 4 anos de idade do povoamento. Em dezembro de 2009, a precipitação mensal foi de 324 mm. A precipitação anual foi de 1278 mm em 2010, 1425 mm em 2011, 1558 mm em 2012 e 1511 mm em 2013. O valor máximo ocorreu em um dia no mês de março de 2011, com uma precipitação de 124 mm.

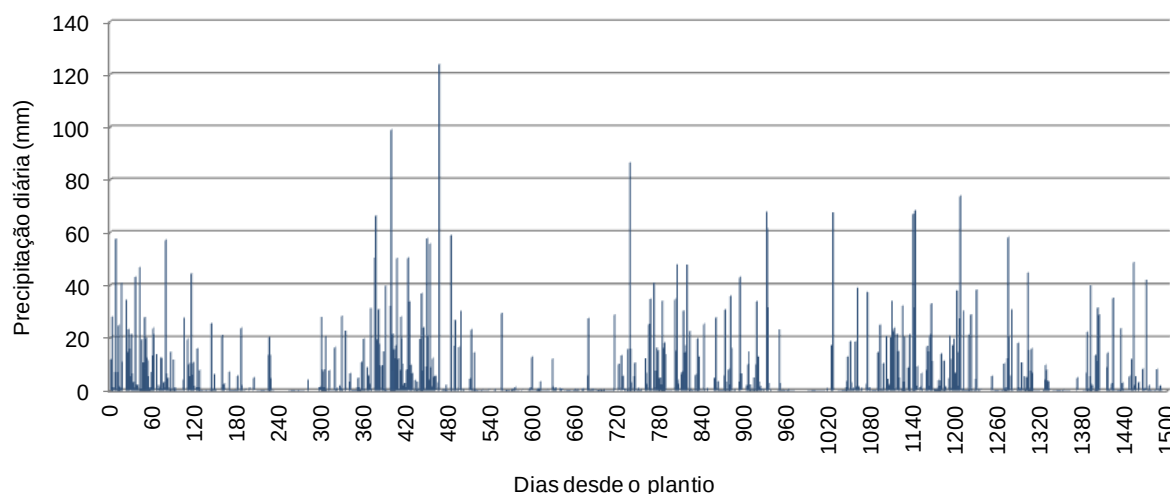


Figura 1: Precipitação diária do período estudado no projeto Eucflux entre o plantio (dezembro de 2009) e a idade de 4 anos (dezembro de 2013).

De acordo com a classificação da FAO, os solos são Latossolos profundos (> 10 m), desenvolvidos em arenito Cretáceo, formação de Marília, grupo de Bauru. O declive é menor que 5% e a altitude máxima de 760 m acima do nível do mar (MAURICE et al., 2010; SILVA et al., 2011). A mineralogia é dominada por quartzo, caolinita e oxihidróxidos, tendo camadas de solo ácidas, com pH entre 3,8 e 5,0 (Tabela 1).

A Figura 2 mostra a área do EUCFLUX dividida em 10 blocos, cada um contendo 16 parcelas. Em cada parcela foi plantado 1 material genético diferente,

totalizando assim 16 materiais genéticos, os quais consistem nos tratamentos do projeto EUCFLUX. Cada parcela foi disposta em 12 linhas x 16 plantas, em um espaçamento de 3 m x 2 m, totalizando assim 36 m x 32 m (1152 m²). Dessa forma, considerando este espaçamento, cada bloco está disposto em 48 linhas x 64 plantas, tendo um total de 144 m x 128 m e uma área de 18432 m² (Figura 3). Todos os blocos foram distribuídos na área para amostrar um gradiente de tipo de solo e também de altitude. Há também uma torre com sistema de *eddy-covariance*, estimando continuamente os fluxos de carbono e água entre a atmosfera e a floresta. Medições complementares no solo (umidade medida a cada 30 minutos até 10 metros de profundidade, emissão de CO₂ medida continuamente, produção e mortalidade de raízes finas medidos com minirrhizotrons) foram usadas como referência neste projeto.

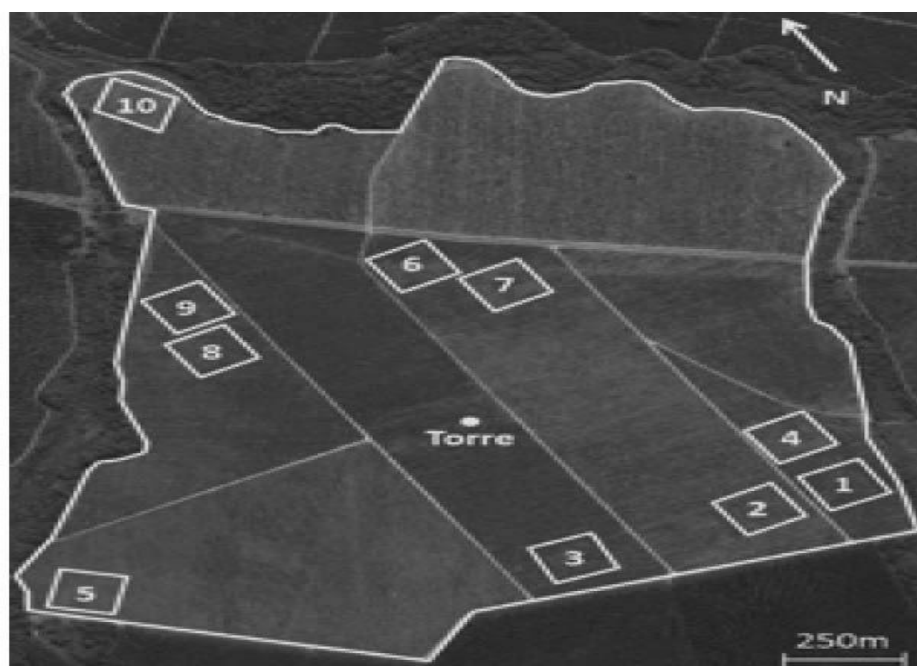


Figura 2: Área da Fazenda Americana contendo a torre de fluxo e os 10 blocos utilizados no projeto EUCFLUX, Itatinga – SP (Fonte: Projeto Eucflux, 2010).

Tabela 1: Principais características do solo dos blocos utilizados no experimento até 14 metros de profundidade. Os desvios padrões são informados entre parênteses (n=3).

Camada de solo (cm)	Bloco	Distribuição do tamanho de partículas (%)			pH	M.O.	P _{resina}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC
		Areia	Argila	Silte	CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³						
		-----mmol _c /dm ³ -----											
0-25	2	79,2 (1,4)	16,8 (1,1)	4,1 (0,4)	3,95 (0,02)	15,11 (2,78)	4,81 (0,42)	46,98 (8,52)	0,57 (0,05)	4,83 (1,29)	2,57 (1,12)	7,97 (0,20)	54,95 (8,38)
25-50	2	78,1 (1,4)	18,0 (1,2)	3,9 (0,4)	4,12 (0,02)	11,07 (0,91)	5,45 (0,73)	34,64 (1,46)	0,60 (0,05)	4,46 (0,00)	1,87 (0,17)	6,93 (0,20)	41,58 (1,65)
50-100	2	75,9 (1,1)	18,5 (0,4)	5,6 (1,6)	4,09 (0,03)	8,98 (0,60)	5,65 (0,90)	28,00 (2,08)	0,68 (0,12)	4,83 (0,64)	1,78 (0,00)	7,28 (0,74)	35,28 (2,74)
100-200	2	71,1 (0,7)	22,5 (1,5)	6,4 (2,2)	4,28 (0,09)	8,95 (1,89)	5,71 (0,45)	21,94 (2,28)	0,55 (0,00)	4,46 (1,12)	1,78 (0,00)	6,78 (1,12)	28,72 (2,23)
200-400	2	70,7 (2,0)	23,3 (0,3)	6,0 (2,3)	4,60 (0,08)	5,61 (0,63)	5,48 (0,56)	14,81 (0,55)	0,55 (0,00)	4,83 (0,64)	1,78 (0,00)	7,15 (0,64)	21,97 (0,81)
400-600	2	67,2 (0,6)	25,9 (0,6)	6,8 (1,1)	4,73 (0,12)	5,07 (0,32)	4,95 (1,10)	13,38 (0,56)	0,60 (0,09)	5,58 (1,93)	1,78 (0,00)	7,95 (2,02)	21,33 (2,35)
600-800	2	65,9 (1,5)	19,0 (6,4)	15,1 (7,9)	4,61 (0,09)	4,97 (0,15)	6,33 (0,87)	13,05 (0,16)	0,60 (0,05)	5,58 (2,23)	1,78 (0,00)	7,95 (2,19)	21,00 (2,06)
800-1000	2	66,6 (0,5)	23,6 (1,9)	9,8 (2,1)	4,49 (0,01)	5,37 (0,35)	4,81 (0,19)	13,10 (0,21)	0,60 (0,05)	4,46 (0,00)	1,78 (0,00)	6,83 (0,05)	19,93 (0,21)
1000-1200	2	71,2 (2,6)	19,8 (4,7)	9,0 (5,7)	4,47 (0,06)	4,77 (0,06)	5,31 (0,72)	12,47 (0,35)	0,60 (0,05)	4,83 (0,64)	1,78 (0,00)	7,21 (0,67)	19,68 (0,94)
1200-1400	2	74,2 (1,2)	20,5 (0,5)	5,4 (0,8)	4,40 (0,00)	5,20 (0,17)	6,41 (0,39)	11,87 (0,07)	0,57 (0,05)	5,58 (1,12)	1,78 (0,00)	7,92 (1,15)	19,79 (1,16)
0-25	3	82,3 (0,6)	14,8 (0,9)	2,9 (0,6)	3,83 (0,16)	17,08 (4,61)	5,54 (1,04)	61,79 (21,74)	0,62 (0,08)	5,20 (0,64)	2,07 (0,51)	7,90 (1,05)	69,69 (22,61)
25-50	3	80,3 (0,7)	17,4 (0,9)	2,4 (0,2)	4,11 (0,09)	10,64 (0,55)	5,96 (0,15)	36,11 (5,27)	0,68 (0,12)	4,83 (0,64)	1,78 (0,00)	7,28 (0,68)	43,39 (4,87)
50-100	3	78,0 (1,3)	19,3 (1,3)	2,7 (0,5)	4,10 (0,03)	9,26 (0,67)	5,76 (0,49)	31,31 (3,86)	0,68 (0,16)	4,46 (1,12)	1,78 (0,00)	6,91 (1,09)	38,23 (2,82)
100-200	3	74,4 (2,5)	22,6 (2,1)	3,0 (0,5)	4,39 (0,18)	12,30 (4,95)	5,26 (0,59)	21,90 (2,83)	0,57 (0,05)	5,58 (1,12)	1,78 (0,00)	7,92 (1,15)	29,83 (2,65)
200-400	3	71,4 (0,7)	24,9 (1,2)	3,7 (0,5)	4,56 (0,03)	6,60 (1,46)	5,99 (0,44)	14,86 (0,36)	0,57 (0,05)	4,83 (0,64)	1,78 (0,00)	7,18 (0,62)	22,04 (0,27)
400-600	3	68,4 (0,3)	27,3 (0,6)	4,3 (0,5)	4,62 (0,07)	5,31 (0,66)	5,99 (0,52)	14,35 (0,23)	0,55 (0,00)	4,46 (1,12)	1,78 (0,00)	6,78 (1,12)	21,13 (1,21)
600-800	3	67,6 (0,4)	26,7 (1,3)	5,7 (0,8)	4,46 (0,05)	5,51 (0,79)	6,16 (1,20)	15,40 (0,70)	0,57 (0,05)	4,83 (0,64)	1,78 (0,00)	7,18 (0,62)	22,58 (1,16)
800-1000	3	67,0 (2,9)	26,9 (1,9)	6,1 (1,4)	4,31 (0,08)	5,20 (0,36)	4,98 (0,05)	19,29 (4,26)	0,62 (0,08)	4,83 (0,64)	1,78 (0,00)	7,23 (0,58)	26,52 (3,98)
1000-1200	3	72,1 (3,9)	16,4 (9,3)	11,5 (11,1)	4,22 (0,03)	5,37 (0,61)	5,62 (0,73)	23,23 (7,32)	0,60 (0,05)	4,83 (0,64)	1,87 (0,17)	7,30 (0,53)	30,53 (7,85)
1200-1400	3	89,7 (0,6)	7,5 (0,7)	2,8 (0,9)	4,37 (0,06)	5,14 (0,31)	5,54 (0,59)	12,02 (0,98)	0,62 (0,08)	4,46 (0,00)	1,78 (0,00)	6,86 (0,08)	18,88 (0,92)
0-25	8	57,3 (4,9)	33,3 (4,7)	9,4 (0,2)	4,20 (0,12)	20,74 (3,79)	7,95 (2,25)	60,96 (19,21)	0,62 (0,08)	5,95 (1,70)	1,87 (0,17)	8,45 (1,81)	69,41 (19,51)
25-50	8	53,0 (0,8)	35,6 (2,8)	11,4 (2,9)	4,19 (0,03)	13,10 (1,83)	5,93 (0,27)	41,31 (6,53)	0,65 (0,12)	5,95 (1,70)	1,87 (0,17)	8,47 (1,51)	49,78 (7,80)
50-100	8	50,0 (3,8)	39,1 (3,0)	10,9 (1,3)	4,31 (0,01)	9,98 (2,50)	5,48 (0,68)	32,44 (2,23)	0,68 (0,16)	4,83 (0,64)	2,07 (0,30)	7,58 (0,79)	40,02 (3,02)
100-200	8	46,3 (4,1)	42,6 (3,4)	11,0 (0,7)	4,59 (0,08)	8,57 (1,98)	5,40 (0,21)	22,28 (1,45)	0,57 (0,05)	4,46 (0,00)	2,07 (0,51)	7,10 (0,56)	29,38 (2,01)
200-400	8	45,6 (2,5)	42,5 (2,5)	11,9 (0,0)	5,03 (0,06)	7,64 (3,78)	5,82 (1,03)	16,63 (0,53)	1,43 (1,46)	7,68 (4,64)	2,57 (1,37)	11,67 (7,46)	28,30 (7,85)
400-600	8	43,7 (3,4)	36,0 (0,8)	20,3 (3,1)	4,74 (0,05)	4,87 (0,21)	5,65 (0,42)	16,63 (0,44)	0,62 (0,08)	4,83 (1,29)	1,78 (0,00)	7,23 (1,22)	23,86 (1,59)
600-800	8	38,8 (5,1)	31,6 (1,7)	29,6 (6,4)	4,44 (0,10)	5,24 (0,21)	5,54 (1,02)	22,95 (3,82)	0,60 (0,05)	5,20 (0,64)	1,78 (0,00)	7,58 (0,62)	30,53 (3,69)
800-1000	8	25,1 (3,0)	30,3 (2,3)	44,6 (0,7)	4,27 (0,04)	5,44 (1,04)	32,81 (30,48)	50,86 (14,12)	0,57 (0,05)	5,20 (0,64)	1,78 (0,00)	7,55 (0,67)	58,41 (13,53)
1000-1200	8	18,9 (4,1)	28,3 (1,1)	52,9 (3,0)	4,24 (0,06)	5,14 (0,35)	67,47 (8,91)	74,48 (11,45)	0,62 (0,00)	5,58 (1,12)	1,78 (0,00)	7,98 (1,12)	82,45 (10,34)
1200-1400	8	19,1 (5,5)	24,1 (4,8)	56,9 (4,5)	4,25 (0,09)	5,57 (0,46)	56,85 (41,90)	63,32 (16,42)	0,55 (0,00)	5,95 (1,29)	3,45 (1,23)	9,95 (2,50)	73,27 (14,02)

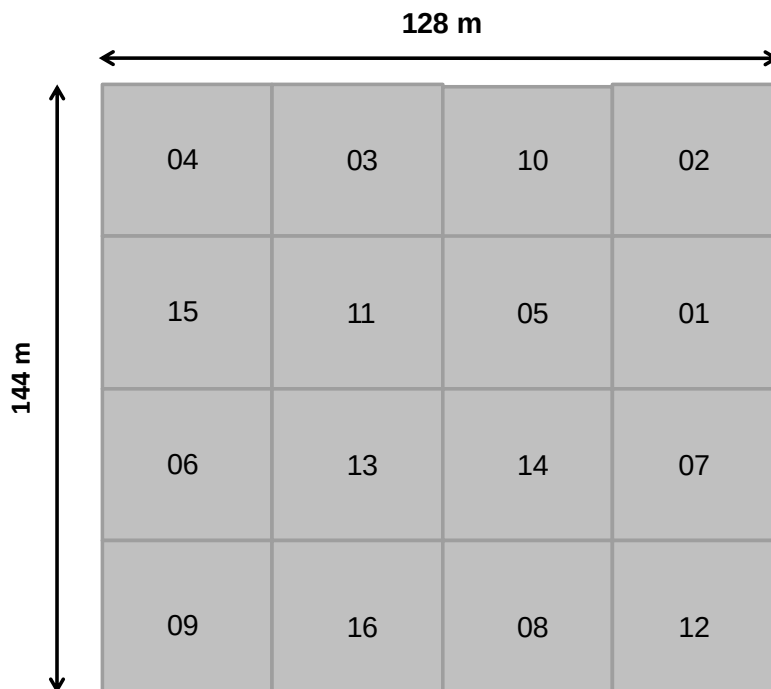


Figura 3: Exemplo de um bloco contendo 16 parcelas que representam 16 materiais genéticos diferentes de eucalipto no projeto EUCFLUX, Itatinga – SP (Fonte: Projeto Eucflux, 2010).

O presente trabalho utilizou como área experimental na primeira amostragem os blocos 2 e 3 do projeto EUCFLUX, utilizando 4 materiais genéticos escolhidos com base em sua adaptação a regiões sob diferentes condições ambientais e à diferente área foliar entre cada um deles. Esses blocos foram escolhidos porque eles estão instalados sobre um Latossolo de textura média/arenosa, muito comum para plantios de eucaliptos no Estado de São Paulo. Medições preliminares mostraram que nesta posição topográfica alta, o lençol freático fica abaixo de 15 metros de profundidade.

Já na segunda amostragem do projeto, as amostragens foram realizadas utilizando dois materiais genéticos nos blocos 3 e 8 (ao invés do bloco 2 utilizado na primeira amostragem), pelo fato destes possuírem textura de solo diferentes entre si, sendo o bloco 3 de textura média/arenosa e o bloco 8 de textura mais argilosa, também estando localizado mais próximo a um curso d'água. O solo do bloco 3 possui de 54 a 273 g kg⁻¹ de argila, 22 a 115 g

kg⁻¹ de silte e 670 a 924 g kg⁻¹ de areia dependendo da profundidade. Já a textura do solo do bloco 8 possui de 187 a 426 g kg⁻¹ de argila, 94 a 569 g kg⁻¹ de silte e 189 a 573 g kg⁻¹ de areia.

O trabalho prosseguiu com apenas um dos materiais genéticos utilizados na primeira amostragem (a fim de comparar os efeitos da idade no desenvolvimento do sistema radicular e por ter possuído o efeito mais contrastante dentre todos na relação IAF/IAR) e com um outro material genético do projeto EUCFLUX por este possuir taxas de respiração (alocação de C) bem diferentes das encontradas no outro em estudos preliminares.

Devido à dificuldade, ao custo e ao tempo consideráveis para coletar amostras de solo em profundidade até o lençol freático (máximo de 17,5 metros na segunda coleta) e separar raízes finas vivas, e também a outros critérios já citados acima, não foi possível utilizar todos os materiais genéticos presentes no projeto EUCFLUX.

Assim, a Tabela 2 mostra a identificação dos materiais genéticos estudados neste trabalho, tanto para a primeira amostragem aos dois anos de idade, como também para a segunda amostragem aos quatro anos, além das empresas que os forneceram. O material genético seminal foi utilizado para verificar se há uma diferença significativa no que diz respeito ao desenvolvimento das raízes finas quando comparado a materiais clonais.

Tabela 2: Empresa fornecedora e espécie de cada um dos materiais genéticos estudados.

Material genético	Empresa	Espécie
Seminal	Duratex S.A.	<i>E. grandis</i>
Clone 08	Cenibra	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Clone 12	ArcellorMittal Bioenergia	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Clone 14	Klabin	<i>E. saligna</i>
Clone 16	Copener (Área seca)	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>

Fonte: Projeto Eucflux, 2010.

3.3. Delineamento experimental

3.3.1. Coleta aos 2 anos de idade do povoamento

Tomando como base o delineamento experimental estabelecido no projeto EUCFLUX, a primeira amostragem de raízes finas foi realizada nos blocos 2 e 3, utilizando as parcelas 01 (seminal - Duratex), 08 (clone Cenibra), 14 (clone Klabin) e 16 (clone Copener), aos dois anos de idade, como tratamentos. Essa primeira amostragem foi feita em duas posições a diferentes distâncias das árvores em cada uma das parcelas. Uma das posições foi localizada o mais próximo possível do centro da parcela útil, no meio de quatro árvores, e a outra posição foi feita a 50 cm de uma árvore, diagonalmente e a uma distância mínima de 10 metros da posição situada ao centro da parcela (Figura 4). Para cada material genético, foram amostrados 4 pontos considerados independentes (2 posições por parcela * 2 blocos). Tudo isso foi realizado para poder considerar que cada posição amostrada é independente das outras e verificar se existe um efeito significativo das distâncias à árvore mais próxima, em relação à densidade de raízes finas.

Assim como feito por Laclau et al. (2013), uma amostragem de solo foi realizada em uma área adjacente não plantada, a fim de comprovar que o período de dois anos entre o corte raso do povoamento anterior e a primeira amostragem de solo neste estudo foi suficiente para distinguir, sem dúvidas, as raízes finas vivas do atual povoamento das raízes mortas do antigo povoamento.

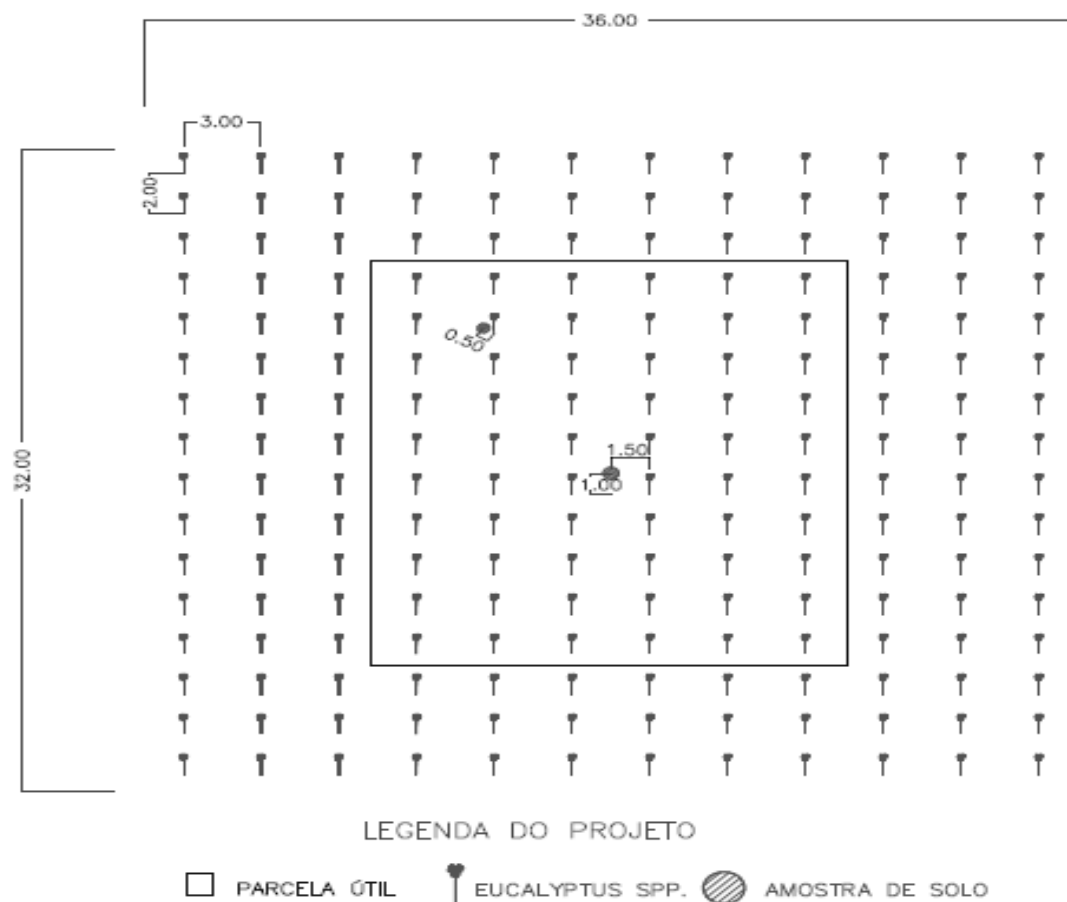


Figura 4: Tamanho da parcela e posição das amostras de solo dentro de cada parcela útil na amostragem realizada aos dois anos de idade.

3.3.2. Coleta aos 4 anos de idade do povoamento

Aos 4 anos de idade, foram estudados dois materiais genéticos nos blocos 3, com solo de textura média/arenosa, e no bloco 8, com solo de textura argilosa. Um deles já foi estudado aos 2 anos de idade (clone de *E. urophylla* x *E. grandis* - Cenibra) e servirá para comparar o efeito da idade no desenvolvimento de raízes finas. O outro também trata-se de um híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* (ArcelorMittal BioEnergia - ex-CAF), o qual possuiu taxas de respiração do solo contrastantes ao clone 8.

A segunda coleta foi feita de maneira um pouco diferente da primeira. No primeiro metro de solo, foi realizada uma amostragem mais intensa do que em profundidade, havendo seis posições por material e por bloco (Figura 5), totalizando 24 pontos

de amostragem de 0 – 1,0 m (0 – 0,25 m, 0,25 – 0,50 m, 0,50 – 1,0 m). Essa amostragem mais intensa em número de repetições no primeiro metro de solo que em camadas mais profundas, foi realizada a fim de se obter uma alta confiabilidade nos resultados, pois é a camada onde se concentra a maior densidade de raízes finas no solo.

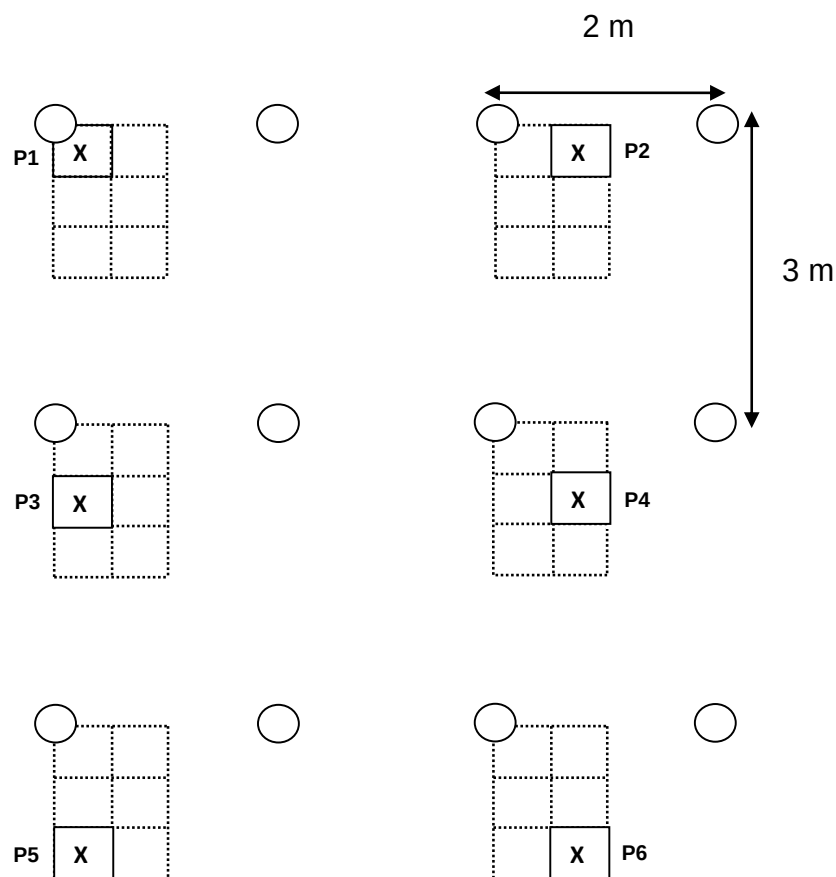


Figura 5: Posições dos pontos de amostragem feitos de 0 – 1 metro para cada material genético em cada um dos blocos utilizados aos 4 anos de idade do povoamento.

A partir de 1 m, três posições (0,30 m, 0,90 m e 1,50 m) de distância da árvore por material e por bloco (Figura 6) foram amostradas ao longo da semidiagonal entre duas árvores, todas selecionadas ao redor dos andaimes instalados. Metodologia muito similar foi utilizada por Christina et al. (2011) e Laclau et al. (2013). Tudo isso foi realizado para poder considerar que as posições amostradas são independentes e para obter densidades médias em cada parcela representativa do povoamento.

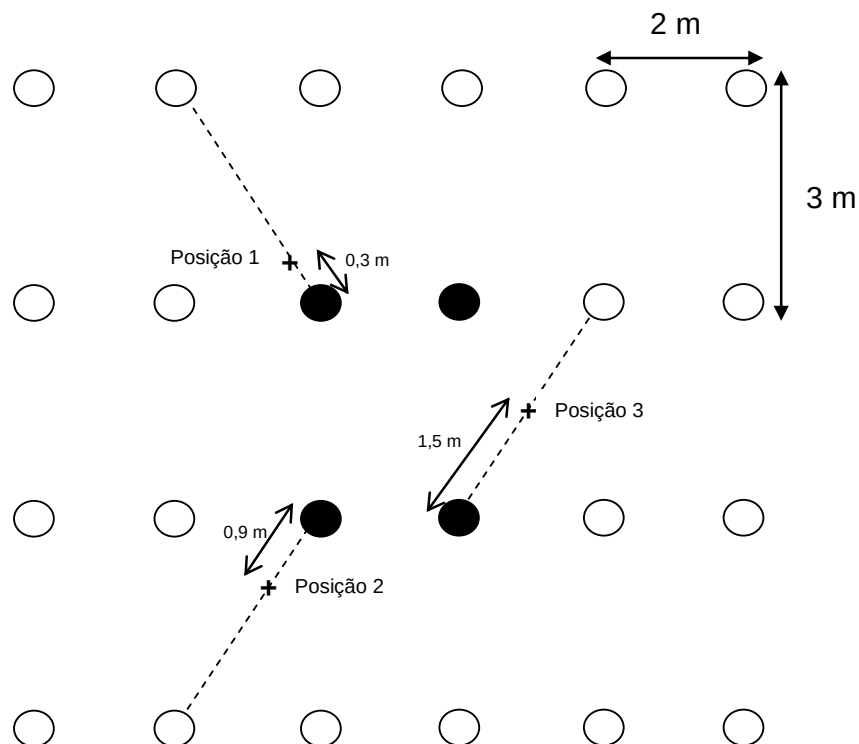


Figura 6: Representação esquemática das três posições de amostragem do solo em cada bloco e em cada material aos 4 anos de idade, utilizando o trado semimecanizado, a partir de 1 m de profundidade. O andaime foi instalado entre as 4 árvores indicadas com um círculo cheio.

3.4. Avaliações de biomassa, comprimento e área de raízes finas

3.4.1. Coleta em campo

Aos 2 anos de idade do povoamento, foi utilizado na amostragem apenas o trado semimecanizado (broca acoplada a barras de ferro tracionados por um motor), de 30 cm comprimento x 9 cm diâmetro, desde a superfície do solo até atingir 13,5 metros de profundidade (Figura 7). O primeiro metro de solo foi dividido nas camadas 0 - 0,25 m, 0,25 - 0,50 m, 0,50 - 1,0 m e as demais amostras foram coletadas de 0,50 em 0,50 m.

Aos 4 anos de idade do povoamento, a sonda cilíndrica de aço (diâmetro interno de 4,5 cm) foi utilizada manualmente para coletar as amostras da superfície do solo, isto é, o primeiro metro de solo, o qual foi dividido em três camadas: 0 - 0,25 m, 0,25 - 0,50 m, 0,50 - 1,0 m. Esta é perfeitamente adaptada à coleta de solo, pois infiltra-se neste por

batidas, impulsionada no solo por uma marreta, evitando danificações na estrutura das raízes (DA SILVA et al., 2009).

A partir de 1 m de profundidade, as amostras de solo foram coletadas de 0,5 em 0,5 m até atingirem o lençol freático do ponto onde foi feita a amostragem, com a utilização do trado semimecanizado e de andaimes, que ajudaram a suportar as barras de ferro. Quando a amostra atingia o lençol freático, encontrando-se bastante úmida, a amostragem no ponto finalizava-se. A profundidade máxima atingida nessa segunda amostragem foi de 17,5 m.

Após a retirada do trado, somente os torrões de solo foram coletados para posterior lavagem e observação da presença de raízes finas, uma vez que parte da terra solta pode ter sido contaminada pelo solo da superfície ou da camada anterior, retendo-se no fundo do trado quando este era inserido.

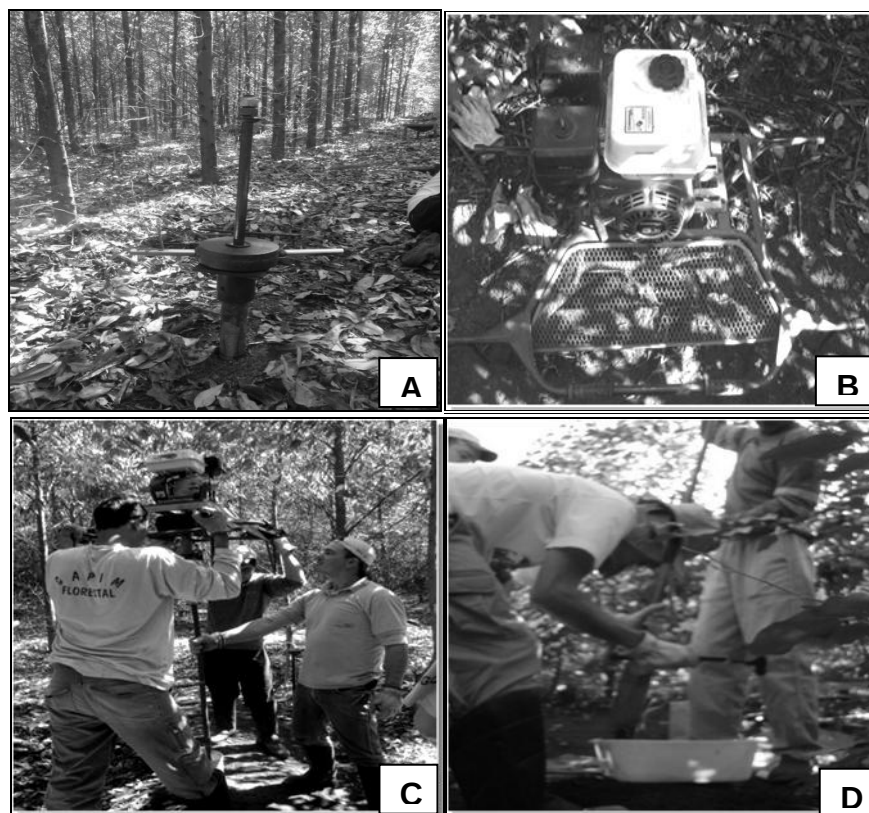


Figura 7: Metodologia e equipamentos usados em campo para coletar as amostras de solo até o lençol freático (máximo de 17,5 m de profundidade aos 4 anos de idade): sonda cilíndrica para amostragem na superfície do solo (A); motor semimecanizado (B); equipe de coleta de campo realizando uma amostragem (C); retirada do torrão de terra do trado (D) – Projeto EUCFLUX (Fonte: Pinheiro, 2011, 2013).

3.4.2. Procedimentos laboratoriais

Posteriormente à coleta de campo, foram amostrados cerca de 20 gramas de solo de cada uma das profundidades coletadas para a determinação do teor de umidade. Assim, obteve-se a massa úmida das amostras por meio de balança analítica de precisão, sendo estas levadas para secagem em estufa por 72 horas a uma temperatura de 105°C. Após a obtenção da massa seca, foi calculado o teor de umidade para cada uma das profundidades do solo, a fim de estimar a capacidade de cada clone em retirar água das camadas mais profundas do solo. Também foram separados aproximadamente 100 gramas de cada amostra para análises química e física do solo.

Em seguida, homogeneizou-se e pesou-se o restante da amostra úmida, dando-se início ao processo de separação das raízes finas, as quais foram classificadas de acordo com seu diâmetro, com o máximo de 2 mm. A mesma classificação foi utilizada por vários autores, tais como Ostonen et al. (2007), Christina et al. (2011), Laclau et al. (2013), Ma et al. (2013), Noguchi et al. (2013).

Cada amostra úmida foi separada em duas subamostras, dependendo da camada de solo (profundidade), sendo uma subamostra para separar apenas raízes finas maiores que 1 cm (≥ 1 cm) de comprimento (lavadas na peneira mais grossa) e outra subamostra para separar raízes finas tanto menores (< 1 cm) como também maiores que 1 cm. Esse procedimento foi tomado porque a quantidade de raízes finas menores que 1 cm de comprimento nas camadas superficiais do solo é muito grande, o que inviabilizaria o tempo de estudo. Posteriormente, a massa de raízes finas menores que 1 cm encontrada em uma das subamostras foi extrapolada para toda a amostra. As amostras de solo das camadas mais profundas não foram fracionadas (100% lavadas na peneira mais fina), pois nestas profundidades havia pouca ou nenhuma quantidade de raízes finas. Além disso, isso foi feito para saber exatamente em qual camada do solo foram encontradas as últimas raízes finas de determinado ponto de amostragem.

As amostras foram lavadas em água corrente, utilizando-se peneiras de diferentes mesh (abertura de 0,5 mm até 1,19 mm). Após lavadas, foram colocadas em recipientes plásticos de fundo branco com água e, com ajuda de luminárias e pinças, deu-se início à seleção das raízes finas vivas. Papéis filtro foram utilizados para a secagem das raízes finas antes do armazenamento em saquinhos de papel.

Os critérios utilizados para a classificação das raízes finas em vivas ou mortas, similarmente à metodologia proposta por Bauhus et al. (1996) e Ma et al. (2013), foram: a) coloração e brilho; b) resistência; c) flexibilidade. Desse modo, raízes com coloração branca e com brilho (quando expostas à luz), com maior resistência e mais flexíveis foram classificadas como raízes finas vivas.

Todas as raízes ≥ 1 cm de comprimento separadas em cada camada foram escaneadas para, posteriormente, possibilitar a análise de suas características

morfológicas, tais como área total, comprimento, largura, volume, diâmetro, entre outras; dados que podem influenciar na capacidade dessas raízes finas em absorver água do solo. No scanner usado, a digitalização é realizada por baixo e por cima das raízes para evitar efeitos da sombra, a uma resolução de 400 dpi. Estas características foram obtidas por meio de um software denominado WinRHIZO Pro - versão 2009b (Régent, Quebec, Canada), que consiste em um sistema de análise de imagens projetado especificamente para a medição de raiz em diferentes formas.

Por último, todas as raízes finas vivas separadas foram colocadas em saquinhos de papel identificados de acordo com o clone, o bloco, a fração da amostra total (%), a posição de amostragem, a profundidade, o comprimento (< 1 cm ou ≥ 1 cm) e a data da separação. Os saquinhos foram levados à estufa à temperatura de 65°C. Após a secagem, as raízes foram retiradas do saquinho e pesadas rapidamente com uma balança com 4 casas decimais (massa seca) para a determinação da densidade de raízes finas por profundidade do solo para cada um dos materiais genéticos estudados.

A partir desses dados foram calculados o comprimento radicular específico (CRE), que consiste na razão entre o comprimento e a massa da raiz, a área radicular específica (ARE), que é razão entre a área e a massa da raiz, e o diâmetro médio de raízes finas (Di).

3.5. Avaliações de biomassa e área de folhas

3.5.1. Coleta em campo

Após realização do inventário completo (censo) em todos os blocos do projeto aos 2 e aos 4 anos de idade, foram estabelecidas classes de diferentes valores de área basal (da menor até a maior árvore) para cada um dos materiais genéticos estudados. Assim, um total de 10 árvores foram amostradas destrutivamente por material genético aos 2 anos de idade. Já aos 4 anos de idade, um total de 6 árvores foi amostrado destrutivamente por material genético e por tipo de textura de solo.

Foram mensurados os raios da copa entre linhas e entre plantas das árvores selecionadas, as quais foram derrubadas (amostragem destrutiva) e foi medido o início de sua copa desde o primeiro ramo com folhas vivas até o ponteiro, sendo então dividida em três terços: terço superior, terço médio e terço inferior. Em cada um dos terços, foram coletadas todas as folhas, as quais foram colocadas em um recipiente plástico, identificadas e pesadas em campo. Casualmente, 30 folhas de cada terço foram escolhidas para posterior digitalização e obtenção da massa seca. Mesma metodologia foi empregada por Laclau et al. (2009).

3.5.2. Procedimentos laboratoriais

Após o procedimento em campo, as 30 folhas coletadas ao acaso foram pesadas em laboratório (massa úmida) e depois escaneadas com resolução de 300 dpi. Em seguida, foram levadas à estufa a uma temperatura de 65°C durante 96 horas, para a posterior obtenção de sua massa seca e da umidade média das folhas do terço da copa representado por estas 30 folhas.

Em posse desses dados, juntamente com os dados da área de cada folha obtidos no software ImageJ, foi possível calcular a Área Foliar Específica (AFE), em $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ e a área foliar (m^2 , multiplicando AFE pela massa seca de folhas do mesmo terço da copa da árvore). As massas secas e as áreas das folhas de cada terço da copa foram somadas para quantificar a biomassa e a área total das folhas de cada árvore amostrada.

3.5.3. Área foliar dos povoamentos

Relações alométricas foram estabelecidas por regressão linear para cada clone entre a área foliar das árvores e a variável D^2H (diâmetro à altura do peito ao quadrado multiplicado pela altura total da árvore). Os valores de R^2 (Coeficiente de determinação) obtidos com as regressões foram maiores ou iguais a 0,90 ($0,90 \leq R^2 \leq 0,95$). As relações foram aplicadas ao inventário de cada clone para estimar a área foliar da parcela interna (excluindo três linhas de bordadura) e o índice de área foliar, dividindo a soma das áreas foliares de todas as árvores pela área da parcela interna.

3.6. Análise dos dados

Para a análise dos dados obtidos no projeto foi utilizado o programa estatístico R, a fim de avaliar a existência de diferença significativa entre a densidade de raízes finas e o índice de área radicular (IAR) total (soma de todas as camadas) e por camada de solo para os quatro materiais genéticos estudados aos dois anos, para o clone 8 aos dois e quatro anos e para o clone 8 e o clone 12 em solos com diferentes texturas aos quatro anos de idade.

Primeiramente, foi feita uma análise descritiva desses dados (média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação). Por meio do teste de Bartlett, foi verificado se houve homogeneidade nas variâncias encontradas. O teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) foi usado para ver se as amostras seguiram uma distribuição normal. Em seguida, foram feitas as análises de variância (ANOVA) para verificar se houve ou não diferença significativa entre as médias dos dados analisados a um nível de 5% significância ($P \leq 0,05$). Por último, foi realizado o teste Tukey para conhecer quais tratamentos, em que foram encontradas diferenças significativas na ANOVA, diferiram entre si.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características das raízes finas dos quatro materiais genéticos de *Eucalyptus* aos 2 anos de idade

4.1.1. Relação entre a altura média das árvores e a profundidade máxima das raízes finas

Para os materiais genéticos seminal e clone 14, a profundidade máxima atingida pelas raízes finas, 8,8 m e 11,7 m, respectivamente, foi superior à altura média mensurada para as árvores desses materiais, que foram de 8,4 m e 9,5 m, respectivamente (Figura 8). Já as raízes finas dos clones 8 e 16 atingiram uma profundidade máxima inferior em comparação à altura média de suas árvores, sendo similares aos dados encontrados por Christina et al. (2011) que, em um estudo de cronossequência utilizando sementes de *Eucalyptus grandis* na mesma região deste trabalho, determinaram uma relação em que a profundidade máxima atingida pelas raízes finas do material utilizado correspondeu a 85% da altura média dos povoamentos estudados.

Em suma, o material seminal foi o que apresentou a relação mais simétrica entre a altura total e a profundidade máxima de raízes finas. Já o clone 14 foi o material cujas raízes finas atingiram a maior profundidade no Latossolo de textura

média/arenosa onde o experimento está instalado, possuindo o menor desvio padrão de todos para o valor encontrado.

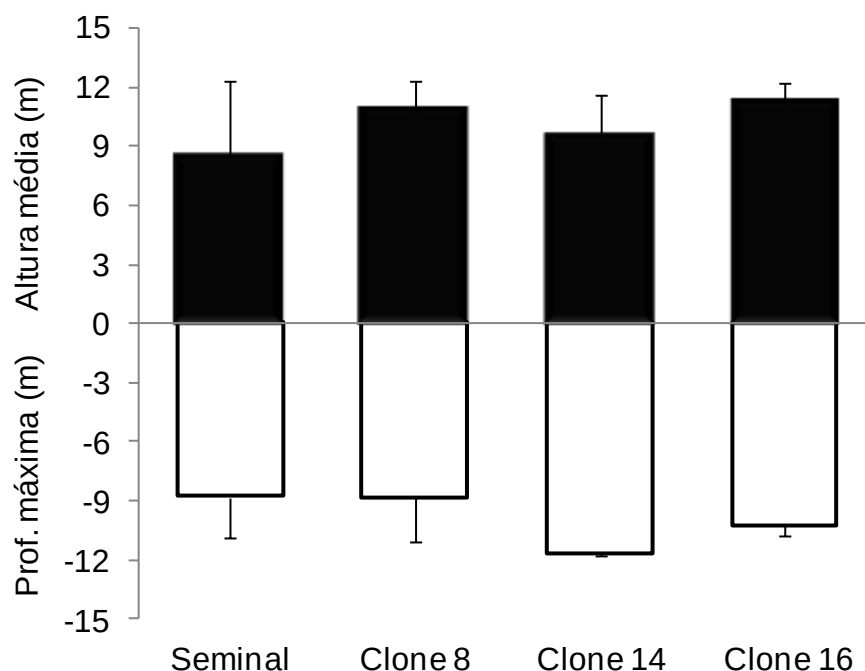


Figura 8: Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (em metros) para os quatro materiais genéticos estudados aos 2 anos de idade. As barras verticais representam os desvios padrões para altura média e profundidade máxima atingida pelas raízes finas dos tratamentos.

Esses resultados confirmam, para vários clones, o resultado preliminar obtido para sementes. Mesmo existindo uma variabilidade entre clones, a altura das árvores pode ser um bom indicador da profundidade máxima atingida pelas raízes finas em um solo de textura média/arenosa sem impedimento do crescimento das raízes.

4.1.2. Densidade das raízes finas (DRF)

Analisando a densidade de raízes finas entre os materiais genéticos estudados, pôde ser observado que, em geral, esta densidade foi maior nas camadas superficiais do solo, atingindo valores de 0,2 a 0,4 g kg⁻¹, reduzindo-se a valores menores que 0,1 g kg⁻¹ abaixo da profundidade de 25 cm, independentemente do material genético (Figura 9). O material seminal e os clones exibiram um padrão similar no desenvolvimento de suas

raízes finas em camadas profundas do solo. Entretanto, há uma tendência de maior densidade média de raízes finas para o material seminal e o clone 14 em comparação ao clone 8.

As análises estatísticas realizadas em cada camada de solo mostraram que não houve diferença significativa entre a densidade de raízes finas entre os materiais genéticos estudados, ao nível de 5% de significância.

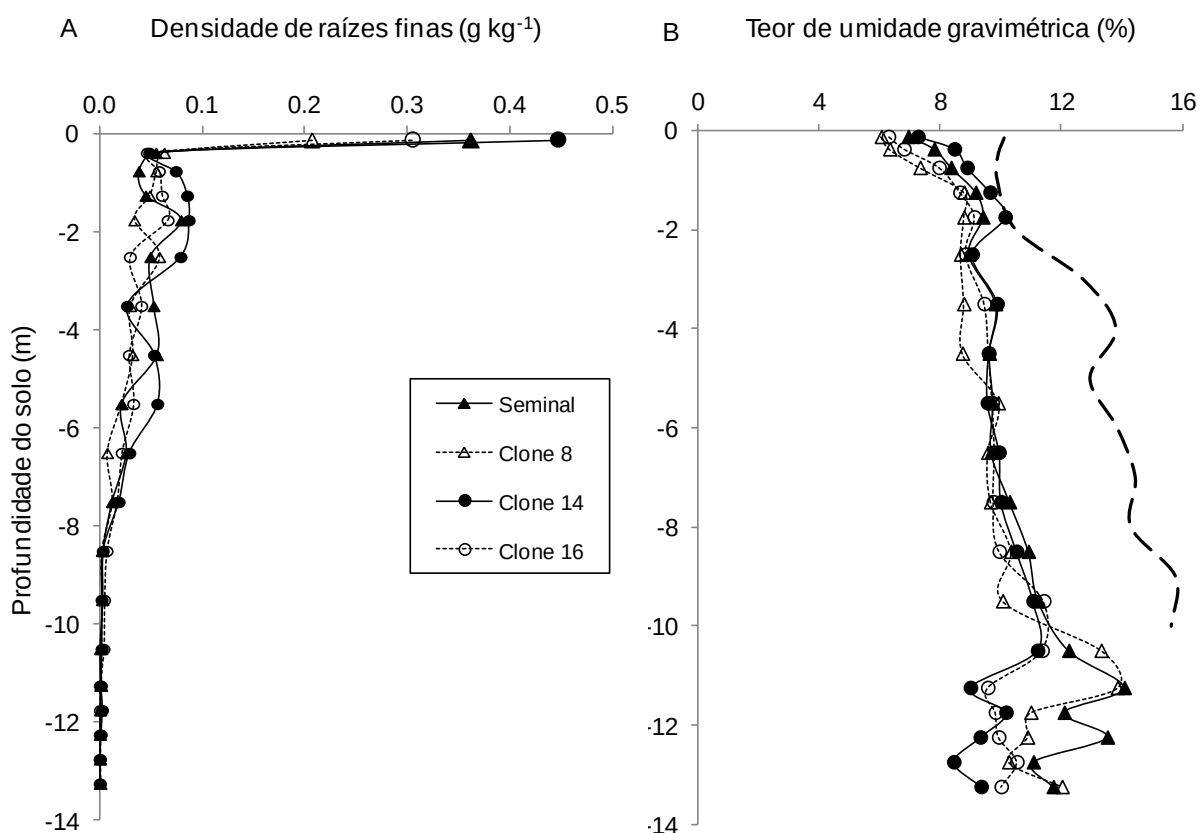


Figura 9: Distribuição de raízes finas: (A) até a profundidade máxima encontrada para os quatro materiais genéticos estudados aos dois anos de idade. Valores médios para as quatro posições independentes estão indicados. Os teores de umidade do solo estão indicados até a profundidade de 13,50 m e a linha tracejada mostra os valores obtidos em 14/02/2010, durante a primeira estação chuvosa após o corte raso (B).

Os perfis de conteúdo de água no solo mostraram que todos os materiais genéticos foram capazes de absorver praticamente a mesma quantidade do estoque de água no solo até 10 metros de profundidade aos 2 anos de idade em solo com textura

média/arenosa. O aumento do teor de umidade do solo na superfície (0 – 2 m), além da diminuição da densidade de raízes finas a partir de 0,25 m, pode ser explicado pelo efeito da água da chuva. Uma parte das amostras de solo obtidas para determinar a umidade do solo foi coletada nas semanas seguintes à ocorrência de chuva. A água da chuva era absorvida na primeira camada e percorria até as camadas seguintes, tornando-as mais úmidas. Um aumento do teor de argila nos 2 primeiros metros também contribuiu para aumentar a capacidade de armazenamento de água no solo e dos teores de umidade.

A partir de 10 m até 13,5 m de profundidade (última camada de solo amostrada na primeira coleta), observou-se que o teor de umidade do solo para o material seminal e o clone 8 foi sempre maior que o teor de umidade do solo para os materiais genéticos 14 e 16. Esse padrão foi consistente na profundidade máxima encontrada para raízes em cada um dos materiais genéticos. Porém, a variabilidade no conteúdo de água no solo abaixo de 10 metros de profundidade também pode refletir diferenças na textura do solo entre as parcelas amostradas.

O clone 14 foi capaz de absorver água do solo a mais de 11,50 m de profundidade, enquanto a profundidade máxima média encontrada para as raízes finas dos materiais 1 (seminal) e 8 não ultrapassou os 9 metros (Tabela 3).

Tabela 3: Profundidade máxima média (desvio padrão, n=3) encontrada para os quatro materiais genéticos de eucalipto aos dois anos de idade em solo de textura média/arenosa.

Material genético	Profundidade média (desvio padrão)
Seminal (n°1)	8,8 m $\pm$ (2,1)
Clone 8	8,9 m $\pm$ (2,2)
Clone 14	11,7 m $\pm$ (0,1)
Clone 16	10,3 m $\pm$ (0,5)

Estudando uma cronossequência de *E. grandis* em solo arenoso na mesma região deste estudo, Laclau et al. (2013) observaram que houve uma rápida diminuição do conteúdo de água no solo durante a primeira estação seca, refletindo a absorção de quantidades substanciais de água pelas raízes das árvores. As séries temporais do conteúdo de

água no solo mostraram o deslocamento da frente radicular até uma profundidade de 7 m dentro de 1,1 anos após o plantio, o que indica uma taxa de crescimento radicular média em profundidade de 1,8 cm ao dia. O conteúdo de água até uma profundidade de 6 - 7 m ao final do período seco após o plantio (cerca de 1 ano de idade) foi similar aos valores encontrados ao final da estação seca antes do corte raso.

Esse padrão indicou que toda a água armazenada disponível a uma profundidade de 6 – 7 m após o corte raso do povoamento anterior já havia sido absorvida 1 ano após o replantio. O solo até mais de 10 m de profundidade foi reabastecido durante a segunda estação chuvosa após o plantio, porém a água gravitacional não atingiu mais de 5 m durante o terceiro ano após o plantio. Amostras de solo mostraram que as raízes mais profundas atingiram uma profundidade de $11,4 \pm 1,6$ m aos 2,1 anos após o plantio (LACLAU et al., 2013). Os resultados deste trabalho confirmam para outros materiais genéticos as observações de Laclau et al. (2013).

Estudando cinco clones diferentes do gênero *Populus* aos 10 anos de idade em cinco camadas até 30 cm de profundidade do solo, Al Alfes et al. (2008) encontraram resultados que variaram significativamente entre clones e entre camadas do solo, constatando que a biomassa de raízes finas diminui com a profundidade do solo.

4.1.3. Relação entre o Índice de Área Foliar e o Índice de Área Radicular

A Figura 10 mostra a relação entre o Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Área Radicular (IAR) entre todos os materiais genéticos. De uma forma geral, considerando a média entre os dois blocos, o IAF teve uma grande variação entre os materiais, sendo o menor de $2,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 16) e o maior de $3,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 8). O IAR, que consiste na superfície total de raízes finas por unidade de superfície de solo, teve uma variação ainda maior entre os materiais, sendo o menor índice médio de $4,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 8) e o maior de $9,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (clone 14).

Portanto, o clone 8 apresentou o maior IAF e o menor IAR, dados que permitem inferir que este material é capaz de manter uma área foliar alta possuindo uma área radicular relativamente baixa. Isso sugere que este material genético possui um controle mais eficiente de perda de água por meio da transpiração em comparação aos demais materiais, isto

é, sua regulação estomática é mais eficaz, fechando seus estômatos sob condições mais secas. Medições de trocas gasosas foliares nesses clones seriam muito interessantes para avaliar esta hipótese. O clone 14 demonstrou ter o comportamento inverso, investindo na exploração de camadas muito profundas do solo por meio de suas raízes finas. Ou seja, o sistema radicular desse clone pode ser capaz de suprir uma grande quantidade de folhas.

A alta variabilidade da relação IAF/IAR entre os quatro materiais genéticos estudados sugere que o enraizamento em camadas profundas do solo deve ser considerado em modelos que visam prever o crescimento de plantios tropicais de eucalipto.

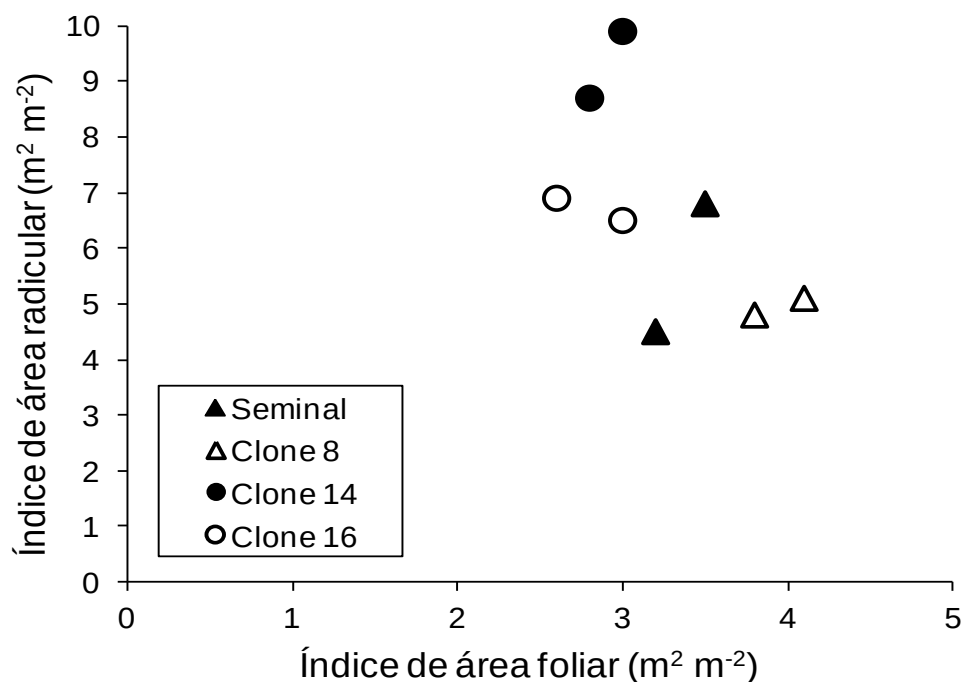


Figura 10: Relação entre o Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Área Radicular (IAR). As duas marcas para cada material genético representam a média em cada uma das 2 parcelas amostradas aos 2 anos de idade. Dez (10) árvores foram amostradas destrutivamente para determinar a área foliar.

Em seu estudo com cinco diferentes clones de *Populus* na Bélgica, Al Alfes et al. (2008) viram que o IAF possuiu diferença significativa entre os clones, variando de 2,1 a 6,0 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$. O menor e o maior valor de IAR encontrados foram de 1,8 e 3,6 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, respectivamente. Os autores encontraram uma correlação significativamente positiva entre o

IAF e IAR para todos os clones em todas as profundidades estudadas, ou seja, o clone que possuiu o maior IAR também foi o que possuiu maior IAF e vice-versa. Concluíram, então, que o IAF pode ser um indicador da área de raízes na camada superficial do solo. Esse resultado é o oposto ao encontrado neste estudo, indicando que a relação IAF/IAR pode variar de espécie para espécie e/ou em função das condições ambientais.

4.1.4. Índice de área radicular (IAR)

A Figura 11 ilustra o IAR encontrado por camada de solo para cada material genético utilizado. Na camada mais superficial (0 a 1 m) e na camada seguinte (1 a 3 m), o clone 14 apresentou um índice de área radicular maior aos demais materiais. Totalizando todas as camadas, esse material atingiu um IAR total de $9,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, enquanto o clone 8 mostrou ter o IAR mais baixo, com $4,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, próximo ao material seminal, que possuiu um IAR de $5,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Houve diferença significativa a 5% de significância entre o clone 14 e dois outros materiais genéticos: o material seminal e o clone 8.

Não houve diferença significativa entre os materiais genéticos por camada de solo a 95% de confiabilidade, com exceção na camada de 1 a 3 metros, onde o IAR do material seminal foi estatisticamente diferente do clone 14, com valores de 1,2 e $3,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente.

Meinen et al. (2009) encontraram valores de IAR variando de 12 a $13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para diferentes espécies de árvores na Europa central. Esses valores mais altos de IAR podem ser explicados pela maior idade das florestas onde foram coletadas as amostras, as quais consequentemente possuem uma maior densidade de comprimento de raízes por m^2 de solo.

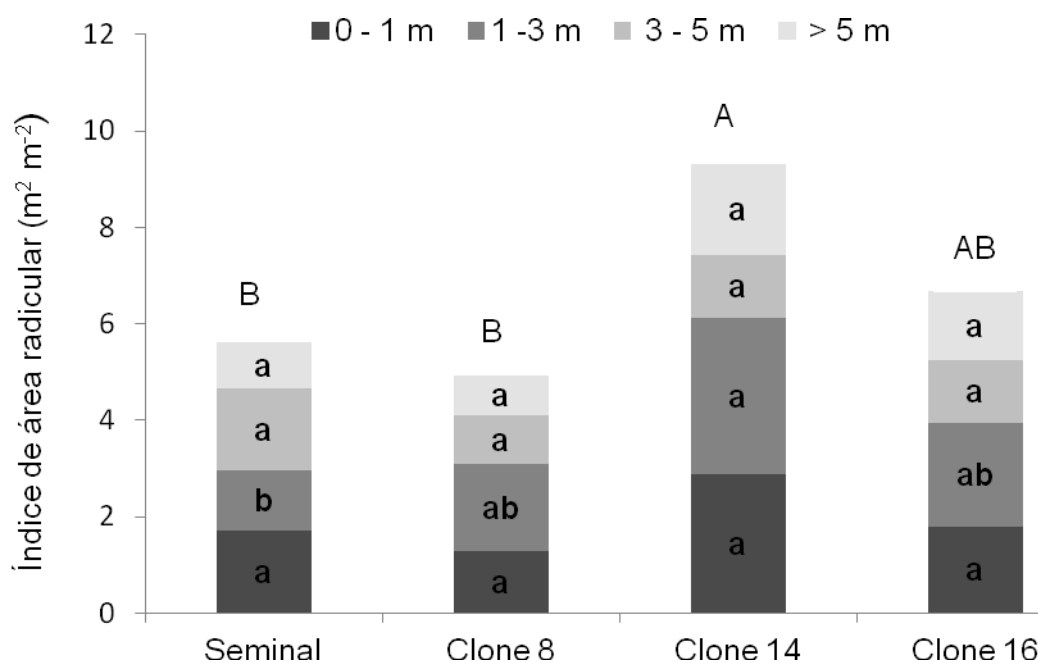


Figura 11: Índice de área radicular ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) por camada de solo para cada material genético. As letras minúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos por camada de solo. As letras maiúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos considerando o total, ou seja, a soma de todas as camadas.

4.1.5. Características morfológicas das raízes finas

A Tabela 4 mostra a média e o coeficiente de variação (%), incluindo todas as profundidades amostradas, para o comprimento radicular específico (CRE), a área radicular específica (ARE) e para o diâmetro (D_i) médio de raízes finas de cada material genético. Um resultado importante deste estudo foi que esses não seguiram uma tendência clara ao longo do perfil do solo, o que sugere que a amostragem de raízes na superfície pode fornecer valores de CRE, ARE e D_i que podem ser extrapolados em camadas mais profundas do solo, cuja amostragem é muito mais difícil (Figura 12).

Tabela 4: Média e coeficiente de variação (C.V.) para a área radicular específica (ARE), o comprimento radicular específico (CRE) e o diâmetro médio (Di) de raízes finas para cada material genético estudado aos 2 anos de idade.

		Seminal	Clone 8	Clone 14	Clone 16
ARE	Média (cm² g⁻¹)	274,7	307,7	345,3	342,3
	C.V. (%)	23	28	33	27
CRE	Média (m g⁻¹)	19,9	22,2	27,4	27,9
	C.V. (%)	29	42	65	47
Diâmetro	Média (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5
	C.V. (%)	29	23	25	23

O menor valor de CRE encontrado foi de 8,7 m g⁻¹ para o clone 14, enquanto o máximo foi de 66,4 m g⁻¹ para o mesmo clone. Em seu estudo, Ostonen et al. (2007) citam que o CRE é bastante dependente das classes de raízes finas e também de cada espécie de árvore, sendo difícil fazer generalizações sobre esse parâmetro, pois seus componentes, tais como diâmetro e densidade do tecido radicular, variam. Em geral, revelaram que o CRE aumentou com o aumento do diâmetro médio das raízes finas. Os valores de CRE para raízes ectomicorrízicas < 1 mm e raízes finas < 2 mm encontrados em seu trabalho variaram de 1,4 a 196 m g⁻¹, em diferentes partes do sistema radicular fino em espécies de árvores diferentes (OSTONEN et al., 2007). O CRE médio de raízes finas ≤ 2 mm variou de 2,2 a 19,2 m g⁻¹ em um povoamento de 28 anos de sugi, espécie conífera japonesa, após três anos de uma fertilização nitrogenada (NOGUCHI et al., 2013).

Rosenvald et al. (2013) relataram que, independente do sítio e das espécies de árvores, árvores jovens necessitam produzir seu sistema radicular rapidamente. Portanto, raízes finas de árvores jovens são pequenas em diâmetro, possuem alto CRE, ARE, frequência de ramificações e baixa densidade de tecido. Confirmando uma das hipóteses de seu trabalho, esses autores observaram que tanto o CRE como a ARE diminuem de forma logarítmica com a idade do povoamento.

Em um estudo de cronossequência (até os 6 anos de idade) de *E. grandis* conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, Maurice et al.

(2010) analisaram que houve uma diminuição no CRE de 28 a 68 meses após o plantio nos povoamentos da cronosequência, com valores variando de 10 a 60 m g^{-1} , inferindo que as características das raízes finas mudaram ao longo do desenvolvimento do povoamento. Esse padrão foi mais pronunciado na profundidade de 10 cm do que nas camadas de solo mais profundas e uma tendência ascendente geral para o CRE com a profundidade do solo foi observada no fim da rotação para os povoamentos instalados em solos de textura média e de textura argilosa.

Nestas condições, aos dois anos de idade do povoamento, os dados possibilitam inferir que o CRE e a ARE podem ser descritos como uma função inversamente proporcional ao diâmetro médio de raízes finas, pois este último parâmetro diminuiu à medida que os outros dois aumentaram e vice-versa.

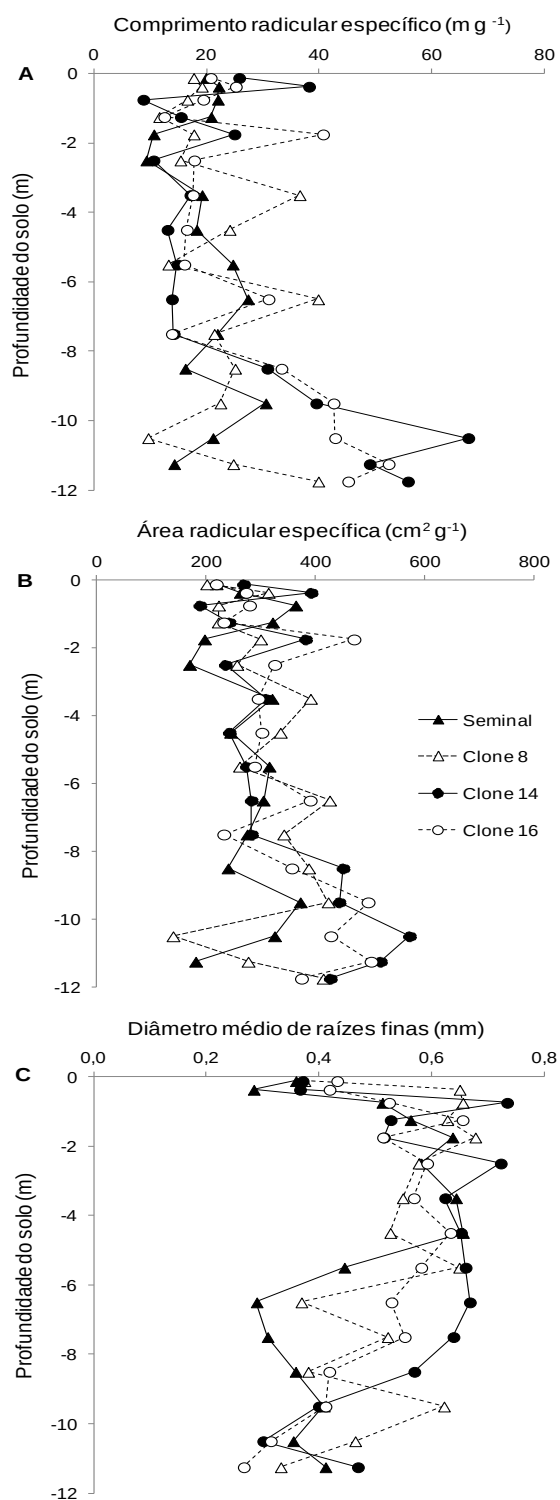


Figura 12: Mudanças no comprimento radicular específico A), na área radicular específica B), e no diâmetro médio C) de raízes finas com a profundidade do solo para quatro materiais genéticos de *Eucalyptus* aos 2 anos de idade.

4.1.6. Massa total de raízes finas

A Figura 13 mostra que cerca de 50% da massa de raízes finas, para todos os materiais genéticos, encontra-se até os 2 metros de profundidade do solo. Até os 8 metros de profundidade, todos os materiais genéticos já possuíam mais de 95% da massa de raízes finas; ou seja, menos de 5% da massa de raízes finas encontra-se abaixo de 8 metros de profundidade no solo estudado. Em geral, a proporção da massa de raízes finas total é praticamente a mesma entre todos os materiais genéticos estudados.

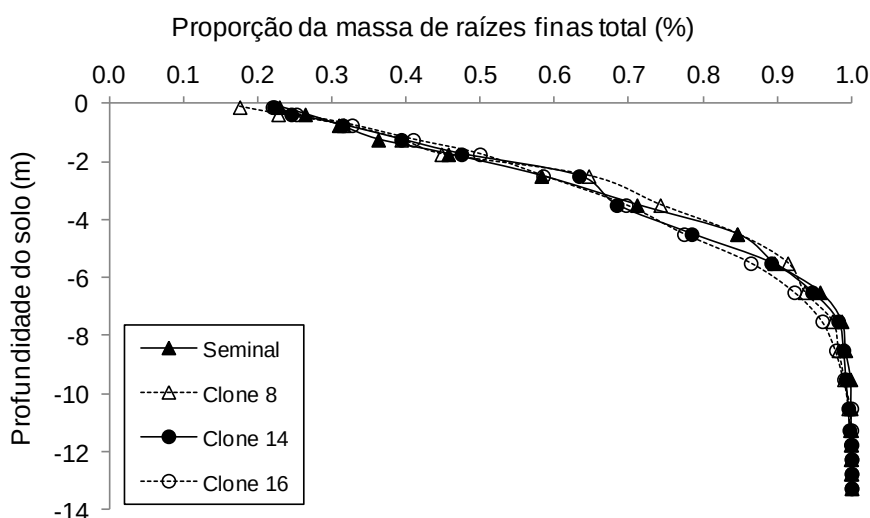


Figura 13: Proporção da massa de raízes finas acumulada até a profundidade máxima atingida aos 2 anos de idade para quatro materiais genéticos de eucalipto.

Em seu estudo de cronossequência de *E. grandis*, Christina et al. (2011) observaram que, embora profundidades abaixo de 10 metros já haviam sido exploradas por raízes finas 30 meses após o plantio, 95% da massa de raízes finas permaneceu em profundidades < 5m do começo ao fim do crescimento do povoamento.

O clone 14 é o material genético que possui a maior massa de raízes finas dentre os 4 estudados na primeira amostragem, totalizando 3735 kg ha⁻¹. O material seminal apresentou uma matéria seca de raízes finas total de 2955 kg ha⁻¹, enquanto o clone 8 e o clone 16 apresentaram valores de 2197 kg ha⁻¹ e 2592 kg ha⁻¹, respectivamente. Ou seja, há uma diferença de até 1500 kg de raízes finas por hectare entre materiais genéticos de eucalipto plantados no mesmo solo aos 2 anos de idade.

Esses dados mostram um investimento em C no solo diferente entre os clones de eucalipto. Isso pode resultar em uma maior capacidade na absorção de água e também de nutrientes disponíveis no solo para os clones com maior densidade de raízes finas. Estudos anteriores mostraram que a partição do carbono entre a parte aérea e subterrânea pode contribuir para explicar a variabilidade espacial de produção de lenho nos talhões de eucalipto (CAMPOE et al., 2012).

4.2. Características das raízes finas do material genético de *Eucalyptus urograndis* (clone 8) aos 2 anos e 4 anos de idade em solo de textura média/arenosa

4.2.1. Relação entre a altura média das árvores e a profundidade máxima de raízes finas

A altura média das árvores do clone 8 dobrou em um período de 2 anos, indo de 10,7 m até 20,9 m aos 4 anos de idade. Já a profundidade máxima média atingida pelas raízes finas variou de 8,9 m a 15,3 m (Figura 14). A relação altura/profundidade máxima aos 2 anos de idade foi de 83%, tendo mais simetria do que a mesma relação aos 4 anos de idade, e sendo muito similar à relação de 85% encontrada nos dados de Christina et al. (2011) em um estudo de cronossequência utilizando sementes de *Eucalyptus grandis* na mesma região deste trabalho.

Já a relação altura/profundidade máxima encontrada para o mesmo clone, no mesmo tipo de solo aos 4 anos de idade foi de 73%. Porém, essa relação não pode ser considerada válida nessa idade do povoamento, uma vez que a média da profundidade máxima encontrada corresponde à camada de solo onde as raízes finas deste material atingiram o lençol freático do respectivo sítio, que no caso é de 15,3 m.

Contudo, é importante frisar que as raízes finas de eucalipto continuaram expandindo-se em profundidade com o passar do tempo no Latossolo estudado, confirmando o rápido deslocamento das raízes dessa espécie de árvore no solo, característica que a coloca em vantagem, quando em competição com outras espécies de árvores, na busca e absorção de água e nutrientes. Para que tais informações tenham ainda mais embasamento,

seria interessante estudar, num projeto futuro, o *turnover* dessas raízes finas e sua velocidade de crescimento, especialmente em camadas profundas do solo.

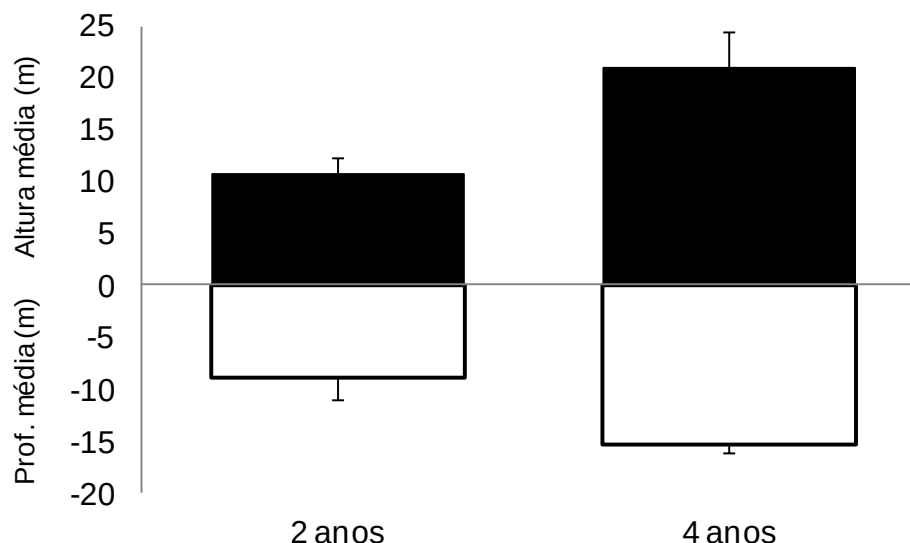


Figura 14: Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (metros) do clone M08 de *Eucalyptus urograndis* aos 2 e aos 4 anos de idade do povoamento no solo de textura média/arenosa. As barras representam os desvios padrões para altura média e profundidade máxima dos tratamentos. As raízes foram encontradas até o lençol freático do sítio estudado (15,3 metros de profundidade para este material aos 4 anos).

4.2.2. Densidade das raízes finas (DRF)

A Figura 15 compara a densidade média de raízes finas do clone 8, *Eucalyptus urograndis*, aos 2 e 4 anos de idade do povoamento em solo com textura média/arenosa. Pode ser visto que na primeira camada de solo (0 – 0,25 m), a densidade de raízes finas dobrou-se após o período de 2 anos para este material genético, passando de uma média de 0,21 g kg⁻¹ à 0,62 g kg⁻¹ de solo, havendo diferença significativa a 5% de significância. A partir dessa profundidade, os valores de densidade diminuem bastante, porém observa-se que a densidade das raízes é sempre maior na amostragem realizada aos 4 anos de idade, sendo maior que 0,08 g kg⁻¹ até atingir 2 metros. A partir daí, há uma pequena diferença entre a densidade de raízes finas nas duas idades, variando de acordo com a profundidade do solo. Com exceção da camada superficial, houve diferença significativa na densidade de raízes

finas entre as duas idades apenas na camada de 11 – 12 m. Esses dados corroboram a hipótese de que a massa das raízes finas aumenta com a idade do povoamento.

Em um estudo de metanálises englobando a biomassa radicular, o comprimento, a área e teor de nutrientes, com um cálculo de um balanço global para cada parâmetro em 10 diferentes biomas do planeta, Jackson et al. (1997) encontraram as mais profundas distribuições de raízes finas nos perfis de solo de florestas tropicais decíduas, florestas coníferas temperadas, florestas tropicais perenifólias, pastagens tropicais/savanas, e desertos.

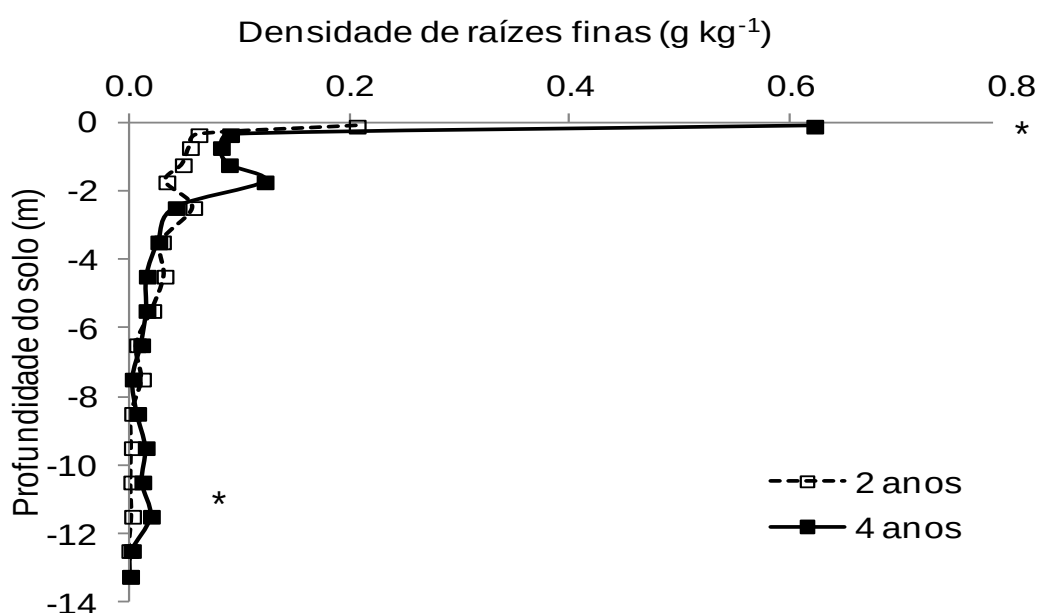


Figura 15: Densidade média de raízes finas (g kg^{-1}) para o material genético de *E. urograndis* aos 2 e 4 anos de idade ao longo do perfil de solo com textura média/arenosa. Diferenças significativas entre os tratamentos ($P \leq 0,05$) são indicadas por *.

A distribuição e abundância das raízes finas diminui com a profundidade do solo na maioria dos ecossistemas florestais (LÓPEZ et al., 2001; AL ALFAS et al., 2008), sendo fatores que podem influenciar nessa diminuição: o aumento com a profundidade na proporção de silte e argila, o conteúdo da matéria orgânica e aeração do solo, a distribuição de nutrientes retornados ao solo por meio da serapilheira, lixiviados da copa e escoamento pelo tronco, ou o estado de sucessão da floresta (LÓPEZ et al., 2001).

4.2.3. Relação entre o Índice de Área Foliar e o Índice de Área Radicular

O material genético de *E. urograndis* apresentou uma pequena redução no seu IAF e um aumento considerável no IAR nesse período de 2 anos. O IAF foi de 4,0 a 3,4 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ entre 2 e 4 anos. Já o IAR variou de 5,0 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ aos 2 anos a 13,5 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ aos 4 anos (Figura 16). Isso indica que este clone, com o passar dos anos, investiu em sua área radicular ao invés de sua área foliar para absorver água e também nutrientes necessários ao seu desenvolvimento.

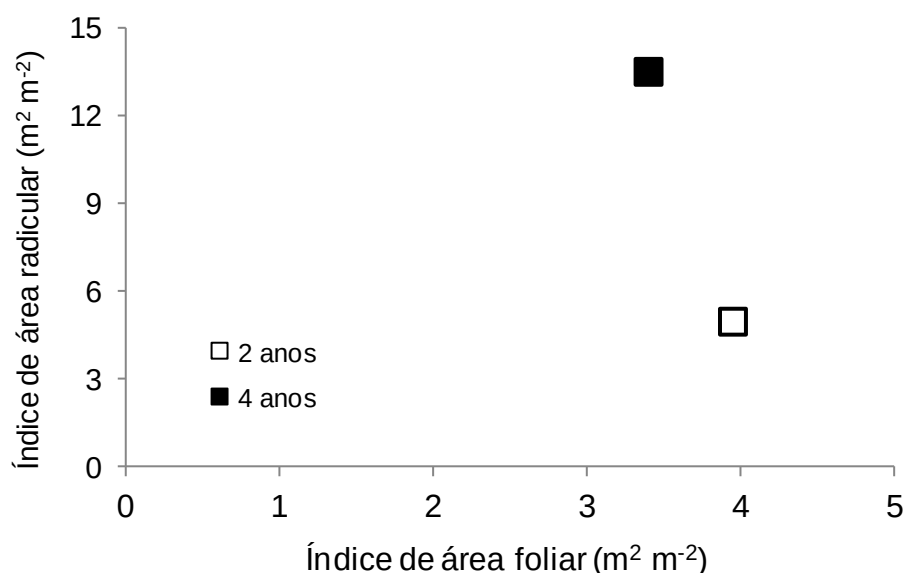


Figura 16: Relação entre o índice de área radicular (IAR) e o índice de área foliar (IAF) para o clone de *Eucalyptus urograndis* (M08) aos 2 e aos 4 anos de idade do povoamento no solo arenoso. Aos 2 anos de idade, o ponto representa a média de 4 pontos de amostragem de raízes em diferentes posições e 10 árvores amostradas destrutivamente para determinar a área foliar. Aos 4 anos, o ponto representa a média de 3 pontos de amostragem em diferentes posições e 6 árvores amostradas destrutivamente para determinar a área foliar.

O prazo de vida das folhas de *E. grandis* foi estudado no estado de São Paulo e variou de 8 a 12 meses para árvores bem nutridas (LACLAU et al., 2009; BATTIE-LACLAU et al., 2013). Já o prazo de vida das raízes em profundidade ainda não foi estudado para o eucalipto.

Jourdan et al. (2008) estudaram um povoamento de *E. grandis* seminais na Estação Experimental de Itatinga (SP), a fim de quantificar os efeitos da

fertilização com N na produção e no *turnover* de raízes finas durante o começo do período de crescimento. Os autores mostraram que o *turnover* de raízes finas foi 1,8 e 1,3 ano⁻¹ nos tratamentos 0 N e 120 N, respectivamente, nos primeiros 30 cm de solo. Porém, uma grande biomassa de raízes finas (diâmetro < 1 mm) foi encontrada até a profundidade de 3 m um ano após o plantio: 1,67 e 1,61 t ha⁻¹ nos tratamentos 0 N e 120 N, respectivamente. Assim, inferiram que o *turnover* de raízes finas pode ser relevante em camadas profundas do solo, onde grandes mudanças no conteúdo de água no solo foram observadas.

O grande aumento do IAR entre 2 e 4 anos de idade encontrado neste trabalho poderia significar um prazo de vida mais longo das raízes finas, mas estudos complementares serão necessários para verificar esta hipótese.

4.2.4. Índice de área radicular (IAR)

A Figura 17 mostra a diferença entre o IAR encontrado no material genético 8 (*E. urograndis*) por camada de solo aos 2 e aos 4 anos de idade do povoamento. É possível observar que o IAR mais do que dobrou em um período de 2 anos.

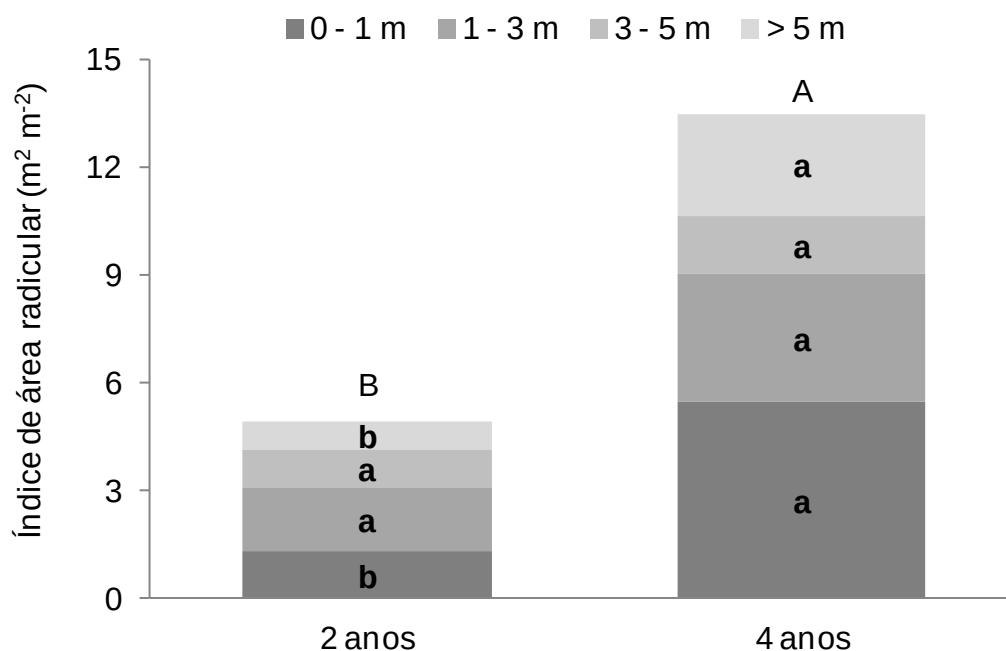


Figura 17: Índice de área radicular ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) por camada de solo para o clone de *Eucalyptus urograndis* (M08) aos 2 e aos 4 anos de idade do povoamento no solo arenoso até 13 metros de profundidade. As letras minúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P < 0,05$) entre os materiais genéticos por camada de solo. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos considerando o total, ou seja, a soma de todas as camadas.

O IAR total encontrado neste material genético aos 2 anos de idade foi de $4,9 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$, sendo menor que a camada superficial de 0 a 1 m do mesmo material ($5,4 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$), no mesmo sítio, aos 4 anos de idade. Já o IAR total do clone 8 aos 4 anos de idade foi de $13,5 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$. A densidade de raízes finas na primeira camada (0 a 25 cm), amostrada no solo aos 4 anos de idade do povoamento, foi muito superior à mesma camada amostrada aos 2 anos, resultando em um IAR médio de $3,3 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ apenas nos primeiros 25 cm do solo.

Houve diferença significativa na camada de 0-1 m e na camada a partir de 5 m de profundidade para o mesmo material genético em idades diferentes. No primeiro metro de solo, o IAR foi de $1,3 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ aos 2 anos e de $5,4 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ aos 4 anos de idade. Já a partir de 5 m até a última camada de solo onde foram encontradas raízes finas, o IAR foi de $0,8 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ aos 2 anos e de $2,8 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ aos 4 anos. Já considerando a soma de todas as camadas do solo, houve diferença significativa a 95 % de probabilidade do IAR do clone 8 entre as duas idades.

Esse valor de $13,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ encontrado aos 4 anos está bem próximo dos valores encontrados por Meinen et al. (2009), os quais variaram de 12 a $13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ em diferentes espécies de árvores decíduas na Europa central, cujo clima é temperado. Porém, neste estudo as idades das árvores variavam de 80 a 146 anos, o que pode explicar uma maior densidade do comprimento das raízes por m^2 de solo e, por conseguinte, um maior IAR. Tal informação permite inferir que o material genético de *E. urograndis* estudado aqui, crescendo em condições climáticas e edáficas ideais para a espécie, além de suas características genotípicas, pode ter um IAR, aos 4 anos de idade do povoamento, equivalente ou até maior que outras espécies de árvores muito mais antigas, em outras regiões do mundo.

Além da provável influência do clima tropical e dos Latossolos sem impedimento para o desenvolvimento radicular nos altos valores de IAR encontrados para o eucalipto já aos 4 anos de idade, uma outra característica deve ser levada em consideração. O povoamento de eucalipto estudado aqui consiste num plantio homogêneo, onde há uma competição intraespecífica e não interespecífica, como aconteceu no estudo de Meinen et al. (2009), não havendo outras espécies de árvores que possuísem sistemas radiculares mais agressivos e inibissem o desenvolvimento das raízes finas de eucalipto. Ademais, o tempo de vida útil de raízes finas de eucalipto em regiões tropicais ainda não foi devidamente estudado, principalmente em camadas profundas do solo, permanecendo um assunto especulativo.

4.2.5. Características morfológicas das raízes finas

A Tabela 5 mostra a média e o coeficiente de variação (%), até os 13 m de profundidade, para o comprimento radicular específico (CRE), a área radicular específica (ARE) e para o diâmetro médio (Di) de raízes finas do material genético 8 aos 2 e 4 anos de idade do povoamento em solo de textura média/arenosa.

O menor valor de CRE encontrado para o clone 8 em solo com textura média/arenosa foi de $9,6 \text{ m g}^{-1}$ aos 2 anos de idade, enquanto o pico foi de $64,5 \text{ m g}^{-1}$ também aos 2 anos de idade, aos 11,5 m de profundidade. Ainda aos 2 anos de idade, houve outros picos aos 3,5 e 6,5 m de profundidade, com valores de 36,5 e $39,8 \text{ m g}^{-1}$, respectivamente (Figura 18).

Tabela 5: Média e coeficiente de variação (C.V.) para a área radicular específica (ARE), o comprimento radicular específico (CRE) e o diâmetro médio (Di) de raízes finas para o clone 8 aos 2 e 4 anos de idade do povoamento.

Clone 8		2 anos	4 anos
ARE	Média (cm ² g ⁻¹)	307,7	258,5
	C.V. (%)	49	28
CRE	Média (m g ⁻¹)	22,2	19,4
	C.V. (%)	67	36
Diâmetro	Média (mm)	0,5	0,5
	C.V. (%)	35	17

Já em relação à ARE, o menor valor foi de 139,8 cm² g⁻¹, aos 2 anos de idade e na mesma camada onde foi encontrado o menor valor de CRE (10,5 m de profundidade). O maior valor de ARE foi de 692,4 cm² g⁻¹, também encontrado na mesma camada onde se obteve o maior valor de CRE, 11,5 m de profundidade. É possível observar que de uma maneira geral, tanto o CRE como a ARE, na maior parte das camadas do solo, foram maiores aos 2 anos do que aos 4 anos de idade. O diâmetro médio de raízes finas variou de 0,33 mm a 0,68 mm, ambos aos 2 anos de idade, sendo maior aos 2 do que aos 4 anos de idade na maior parte do perfil do solo (Figura 18).

Isso pode ser explicado pelo fato de árvores jovens necessitarem desenvolver seu sistema radicular rapidamente, independente do sítio e da espécie de árvore. Dessa forma, raízes finas de árvores jovens são pequenas em diâmetro, possuem alto CRE, grande ARE, alta frequência de ramificações e baixa densidade de tecido, e consequentemente tendem a desenvolverem-se mais facilmente.

Segundo Rosenvald et al. (2013), em povoamentos jovens, a densidade do tecido radicular e também o diâmetro radicular são menores devido ao rápido crescimento e expansão do sistema radicular em uma idade jovem. Maiores CRE e ARE de árvores mais jovens podem garantir sua habilidade competitiva superior em condições de estresse mais altas. Geralmente, nas florestas regeneradas naturalmente, a competição entre árvores é maior em povoamentos mais jovens, onde a densidade de povoamento é maior, levando a uma

competição de raízes e luz mais alta. Por isso, árvores jovens têm que aplicar estratégias compensativas eficientes.

Rosenvald et al. (2013) e Maurice et al. (2010), em seus estudos de cronossequência de bétula prata (*Betula pendula*) e de *E. grandis*, respectivamente, constataram que tanto o CRE como a ARE diminuem de forma logarítmica com a idade do povoamento, sendo esse padrão mais pronunciado na profundidade de 10 cm do que nas camadas de solo mais profundas. Rosenvald et al. (2013) viram que o diâmetro das raízes ectomicorrízicas estudadas aumentou com a idade do povoamento, diferentemente dos resultados encontrados neste trabalho. Entretanto, esses autores coletaram amostras de solo somente nos primeiros 20 cm de profundidade.

Este estudo, em geral, também mostra que na grande maioria das camadas do solo, o CRE e a ARE diminuíram com a idade tendo, porém, um padrão mais pronunciado nas camadas mais profundas do que em camadas superficiais.

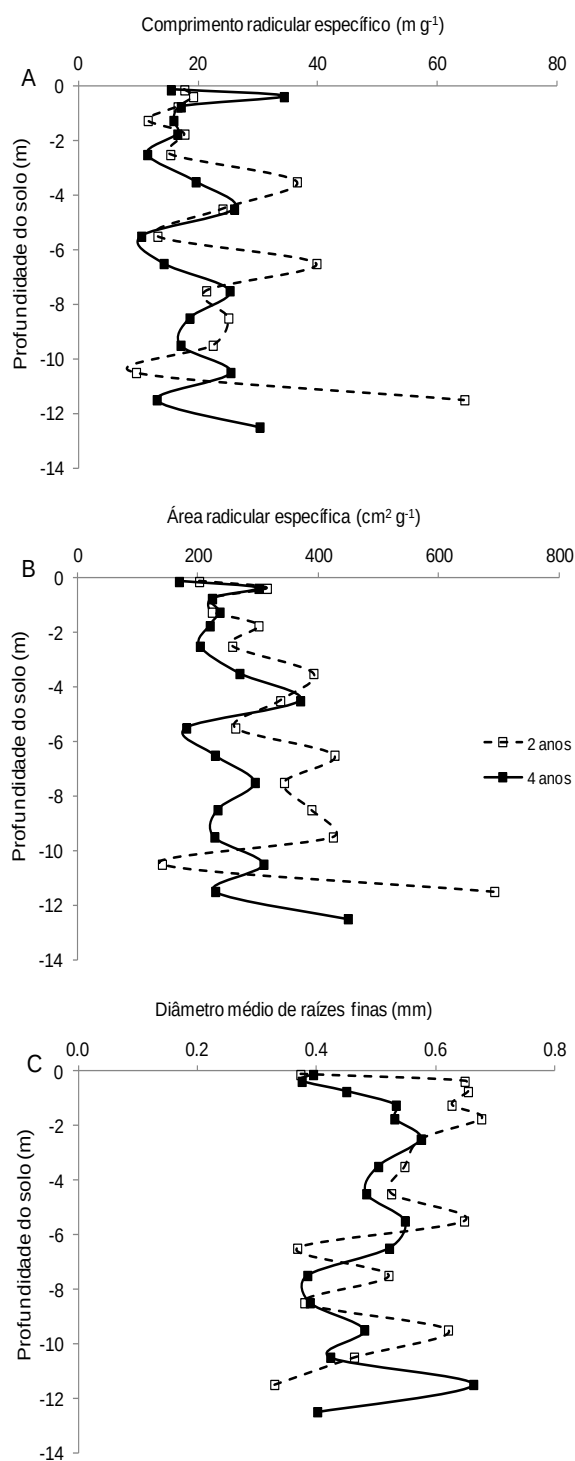


Figura 18: Mudanças no comprimento radicular específico A) na área radicular específica, B) e no diâmetro médio C) de raízes finas com a profundidade do solo para dois clones de *Eucalyptus urograndis* em solos com diferentes texturas aos 4 anos de idade.

4.2.6. Massa total de raízes finas

A Figura 19 mostra que o clone 8, aos 2 anos de idade, possuiu 45% da massa de raízes finas até os 2 metros de profundidade no solo de textura média/arenosa. Já aos 4 anos de idade, a porcentagem de massa das raízes nos dois primeiros metros de solo foi de 66%, mostrando que o material acumulou maior massa de raízes na superfície ao longo de 2 anos. Até os 6 metros de profundidade, esse material genético já possuía mais de 90% da massa de raízes finas com 2 anos, enquanto aos 4 anos de idade a proporção da massa de raízes finas foi maior que 90% a partir de 9 metros de profundidade. Aos 2 anos, o clone 8 atingiu 100% de sua massa de raízes finas total até os 10 metros de profundidade. Aos 4 anos, o mesmo clone atingiu 100% da massa de raízes finas com 12 metros de profundidade, confirmando que a quantidade e a massa de raízes finas aumenta em profundidade com o passar do tempo.

Os dados apresentados demonstram que o material de eucalipto estudado foi capaz de aumentar a produção de raízes finas na superfície do solo num período de 2 anos. Esse aumento da massa de raízes pode ter ocorrido devido à necessidade da árvore de absorver mais água e nutrientes para seu desenvolvimento. A ciclagem biogeoquímica nos povoamentos de eucalipto concentra os nutrientes nas camadas superficiais do solo com a deposição de serapilheira, mortalidade das raízes finas, chegada da chuva sob dossel e escoamento do tronco enriquecidos em nutrientes (LACLAU et al., 2013). Outro fator que deve ser levado em consideração nesse aumento é a longevidade da raiz fina de eucalipto, um assunto que deve ser estudado com mais ênfase.

Considerando até 13,5 metros de profundidade, aos 2 anos de idade, o clone 8 teve uma massa de raízes finas total de 2197 kg ha⁻¹. Levando em consideração a mesma profundidade aos 4 anos, o mesmo material possuiu uma massa de raízes finas total de 6853 kg ha⁻¹, o que representa um aumento de 212% (4656 kg ha⁻¹). Ou seja, a massa de raízes finas total do material de *E. urograndis* em solo de textura média/arenosa mais que triplicou ao longo de 2 anos, o que comprova que a massa de raízes finas aumenta com a idade do povoamento.

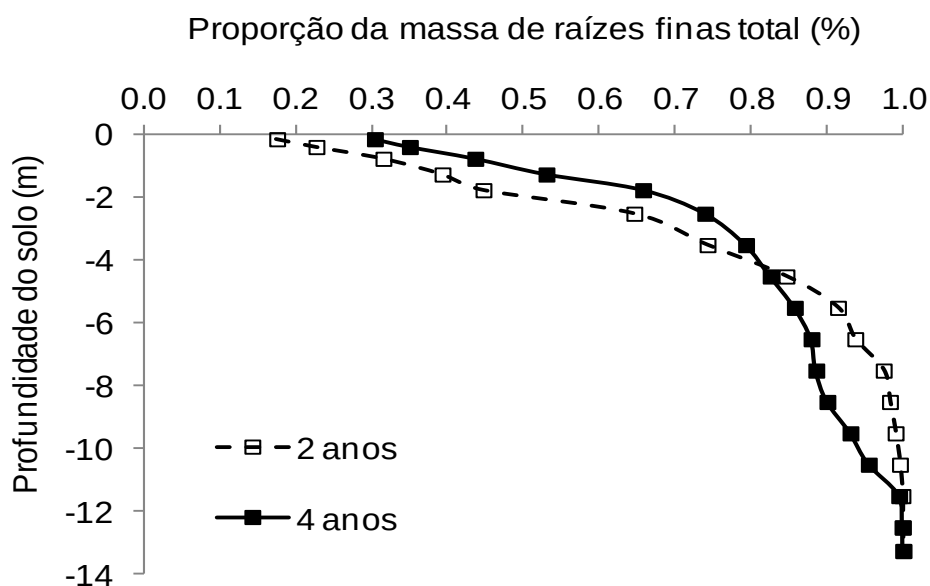


Figura 19: Proporção da massa de raízes finas acumulada até a profundidade máxima atingida pelo clone de *Eucalyptus urograndis* aos 2 e aos 4 anos de idade em solo de textura média/arenosa.

4.3. Características das raízes finas de dois materiais genéticos de *Eucalyptus urograndis* aos 4 anos de idade e em dois tipos de solo

4.3.1. Relação entre a altura média das árvores e a profundidade máxima de raízes finas

A altura média do povoamento de cada material genético em determinado tipo de solo variou muito pouco, sendo o menor valor de 20,9 m para o clone 8 no solo de textura média/arenosa (Bloco 3 – B3) e o maior valor de 22,6 m para o clone 12 no mesmo solo de textura média/arenosa. Em relação à profundidade média atingida pelas raízes finas, também observa-se que há uma diferença muito pequena entre os dois materiais genéticos nos dois tipos de solo. A profundidade mínima foi de 14,8 m para o clone 12 no solo de textura média/arenosa e a máxima foi de 15,4 m para o mesmo clone no solo de textura argilosa (Bloco 8 – B8) (Figura 20).

Entretanto, é difícil fazer essa relação altura/profundidade máxima atingida pelas raízes finas dos materiais de eucalipto no local de estudo aos 4 anos de idade do povoamento. Nestas condições, as raízes finas até 2 mm de diâmetro já atingiram o lençol

freático do sítio local, o que dificulta a continuação da amostragem com o trado, e mostrando que o sistema radicular dessa espécie florestal possui um rápido deslocamento vertical nos Latossolos profundos em estudo, capaz de absorver a água de que necessita para se desenvolver.

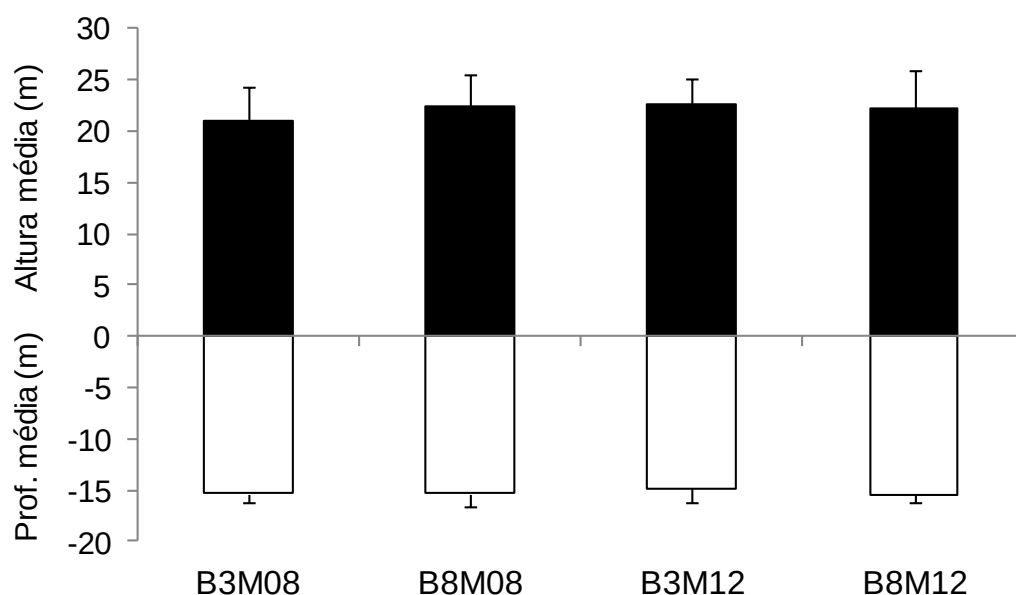


Figura 20: Média da altura das árvores e da profundidade máxima alcançada pelas raízes finas (em metros) dos dois clones de *Eucalyptus urograndis* em solos com diferentes texturas aos 4 anos de idade. As barras verticais representam os desvios padrões para a altura média e a profundidade máxima atingida pelas raízes finas dos tratamentos.

4.3.2. Densidade das raízes finas (DRF)

A Figura 21 mostra a densidade de raízes finas obtida aos 4 anos de idade, para o clone 8 e o clone 12 do projeto Eucflux, em solos com diferentes texturas. Nos primeiros 25 cm de solo, observa-se que ambos os materiais 8 e 12 possuem uma DRF maior no solo de textura média/arenosa (valores de 0,62 e 0,54 g kg⁻¹, respectivamente) em comparação ao solo de textura mais argilosa, cujos valores são de 0,29 g kg⁻¹. Foi encontrada diferença significativa nessa primeira camada do solo entre o clone 8 no solo de textura média/arenosa e os dois clones no solo com textura argilosa.

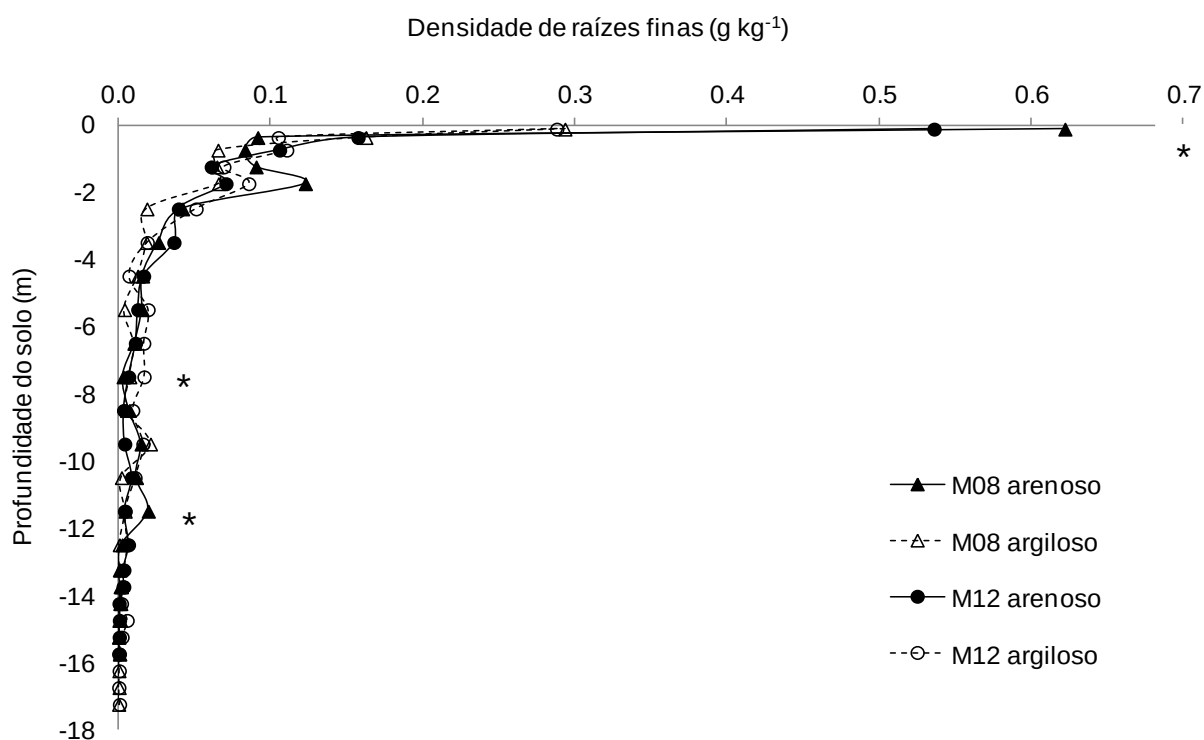


Figura 21: Densidade média de raízes finas (g kg^{-1}) dos materiais genéticos 8 e 12 até 17 metros de profundidade, em diferentes texturas de solo, aos 4 anos de idade. Diferenças significativas entre os tratamentos ($P \leq 0,05$) são indicadas por *.

Até os 2 metros de profundidade, ainda é possível observar valores acima de $0,1 \text{ g kg}^{-1}$, mais especificamente para o clone 8 em solo arenoso. A partir dessa camada, os valores vão diminuindo gradativamente para os 2 materiais genéticos e também para os 2 tipos de textura de solo, mostrando um padrão similar nas condições estudadas. Entretanto, foram encontradas diferenças significativas (ao nível de 5% de significância) em duas camadas ao longo do perfil do solo. Na camada de 7 – 8 m de profundidade, o clone 12 em solo de textura argilosa foi significativamente diferente do clone 8 nos dois tipos de solo e do próprio clone 12 em solo de textura média arenosa. Já na camada de 11 – 12 m, o material genético 8 em solo arenoso teve diferença significativa em relação aos demais tratamentos.

Ambos os materiais genéticos possuem raízes finas até os 16 m de profundidade no bloco 3 (textura média/arenosa) e até os 17,5 m no bloco 8, cuja textura é mais argilosa. Isso significa que as raízes finas de ambos os clones, mesmo em pequena

quantidade, possuem a capacidade de absorver água até atingir o lençol freático do sítio amostrado.

Laclau et al. (2013), estudando uma cronossequência de plantios de *E. grandis* em Itatinga/SP, mostraram que houve uma grande variabilidade espacial na densidade de raízes finas (DRF) e na densidade de raízes médias (DRM) em camadas profundas do solo. Grandes mudanças na DRF, dependendo da idade da árvore, mostraram que a DRF teve uma tendência a aumentar nos primeiros 5 cm da camada de solo no final do ciclo de rotação. A textura do solo também teve um efeito significativo na distribuição de raízes finas aos 6 anos de idade, sendo que a DRF média até 10 m de profundidade foi 40% maior no solo argiloso em comparação ao solo arenoso.

Embora a maior DRF tenha sido encontrada na superfície do solo, menos de 20% do total de raízes finas até 10 m de profundidade foram contadas na camada de 0 - 50 cm a 1, 3 e 6 anos de idade nos povoamentos da cronossequência. A proporção de raízes finas abaixo da profundidade de 4 m aumentou com a idade do povoamento. Elas representaram 5% do total de raízes finas no povoamento de 1 ano de idade, 10% no povoamento com 3 anos, 15% no povoamento de 6 anos de idade da cronossequência e 20% no povoamento de 6 anos de idade no solo argiloso (LACLAU et al., 2013).

Em estudo realizado com um outro clone de *Eucalyptus* aos 2 anos após o plantio no mesmo projeto Eucflux, Lambais et al. (2012), constataram que a densidade de raízes finas foi maior em solo com textura média/arenosa (variando de 0,3 à 1,2 g kg⁻¹) do que o solo com textura mais argilosa, cuja densidade variou de 0,1 à 0,2 g kg⁻¹. Enfim, concluíram que há uma tendência geral de maior densidade de raízes finas até cerca de 7 m de profundidade para o solo arenoso em comparação ao solo argiloso. Uma tendência semelhante foi encontrada neste estudo.

O teor de umidade gravimétrica de água no solo mostrou que o conteúdo de água ao longo do perfil do solo variou conforme sua textura. Da superfície ao lençol freático, a umidade do solo do bloco 3 (textura média/arenosa) variou de 6 à 19%, enquanto no bloco 8 (textura argilosa) a variação foi de 13 à 34% (Figura 22). Esta maior umidade no solo de textura argiloso acontece porque as partículas desse tipo de solo são menores (microporos), aumentando sua capacidade de retenção de água. Nas profundidades

entre 10,5 e 12,5 metros no solo de textura média/arenosa, notou-se que a umidade do solo foi maior no clone 8 em relação ao clone 12, fato que talvez possa ser explicado por haver uma camada com textura mais argilosa nessa parcela.

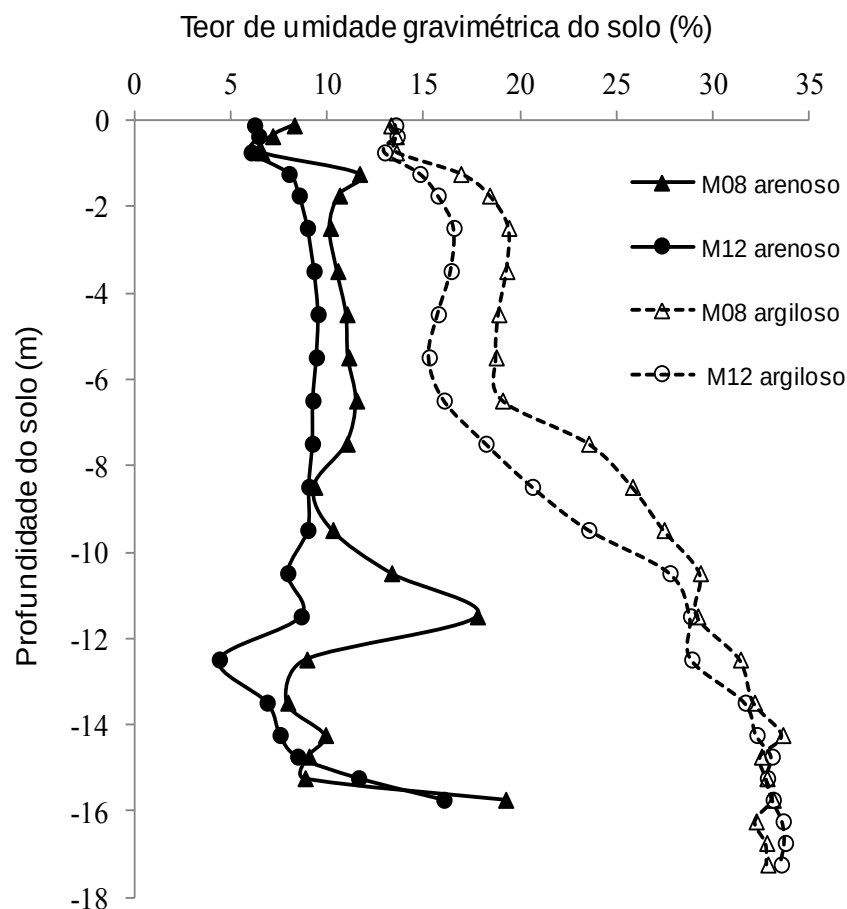


Figura 22: Teor de umidade gravimétrica do solo (%) para os dois clones de *E. urograndis* até 18 metros de profundidade, em dois tipos de solo, aos 4 anos de idade.

4.3.3. Relação entre Índice de área foliar (IAF) e Índice de área radicular (IAR)

Estimativas globais do IAF (m^2 de área superficial foliar por m^2 de superfície do solo) são conhecidas com muito mais precisão que os valores do IAR globais previamente gerados no estudo de metanálises de Jackson et al. (1997) que, baseado em seus resultados, observaram que o IAR é ao menos comparável ao IAF em todos os sistemas terrestres, e substancialmente maior na maioria desses sistemas.

A Figura 23 mostra a relação entre o IAF e o IAR dos materiais genéticos estudados nos solos de textura média/arenosa e argilosa. A relação entre esses dois parâmetros foi praticamente igual para o clone 12, tanto no solo arenoso ($IAR = 14,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $IAF = 4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) como no solo argiloso ($IAR = 14,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $IAF = 3,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Já o clone 8 apresentou uma razão IAR/IAF maior no solo arenoso que no solo argiloso, tendo uma relação menos simétrica.

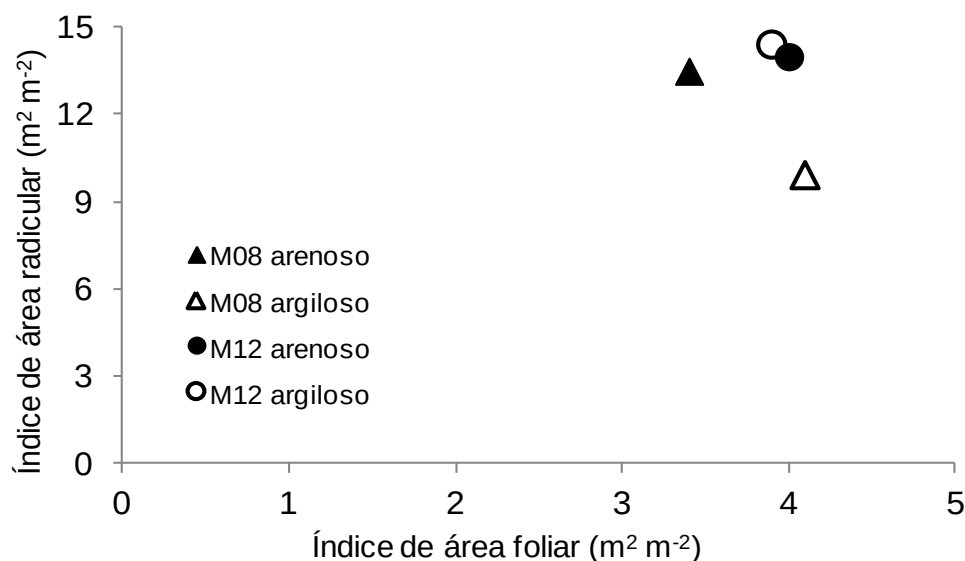


Figura 23: Relação entre o índice de área radicular (IAR) e o índice de área foliar (IAF) dos dois clones de *Eucalyptus urograndis* em solos com diferentes texturas aos 4 anos de idade do povoamento. Os pontos representam as médias de 3 pontos de amostragem de raízes em diferentes posições para cada material genético em cada tipo de solo e 6 árvores amostradas destrutivamente para determinar a área foliar.

Esses resultados indicam que a textura do solo pode influenciar tanto a área radicular como a área foliar de um mesmo material genético. No caso desse estudo, o clone 8 no solo argiloso parece investir mais em folhas do que em raízes finas para a absorção dos recursos para se desenvolver. Porém, a relação IAF/IAR do mesmo clone 8 no solo arenoso é bastante similar à mesma relação para o clone 12, em ambos os tipos de solo. Uma provável hipótese é que os estômatos das folhas do clone 8 em solos argilosos, controlam melhor a perda de água por evapotranspiração, dependendo menos do desenvolvimento de suas raízes finas para absorção de água do que os outros materiais.

4.3.4. Índice de área radicular (IAR)

A Figura 24 ilustra o IAR encontrado por camada de solo nos dois materiais genéticos utilizados aos 4 anos de idade nos dois tipos de solo. Tanto o clone 8 como o clone 12 tiveram um IAR maior ($5,4$ e $6,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente) no solo de textura média/arenosa em comparação ao solo com textura argilosa, considerando o primeiro metro de solo. Estatisticamente, houve diferença significativa apenas na camada de 0-1 m entre o clone 12 no solo arenoso ($6,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) e o clone 08 no solo arenoso ($3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$).

Nas camadas de 1-3 m e de 3-5 m de profundidade, a diferença do IAR entre os materiais nos 2 tipos de solo é pequena. Já a partir dos 5 m de profundidade, o clone 12 no solo argiloso possuiu um IAR praticamente 2 vezes maior ($4,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) em relação ao mesmo clone no solo arenoso e ao clone 8 nos dois tipos de solo, porém a alta variabilidade espacial não permitiu detectar diferenças significativas ao nível de 5% de significância.

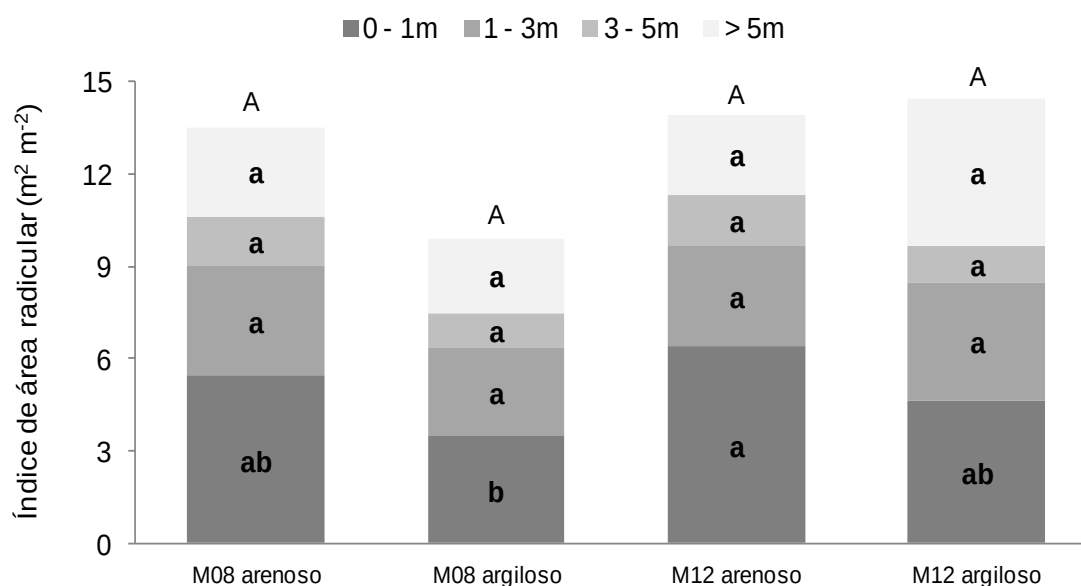


Figura 24: Índice de área radicular ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) por camada de solo dos dois clones de *Eucalyptus urograndis* (M08 e M12) aos 4 anos de idade do povoamento, nos solos de textura argilosa e média/arenosa. As letras minúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos por camada de solo. As letras maiúsculas diferentes indicam se há diferença significativa ($P \leq 0,05\%$) entre os materiais genéticos considerando o total, ou seja, a soma de todas as camadas.

Os resultados indicam um comportamento diferente dos 2 clones do mesmo híbrido (*E. urograndis*) em função da textura do solo. Enquanto o clone 12 possui a mesma área total de raízes finas nos 2 tipos de solo estudados, o clone 8 reduz em 27% a sua área de raízes finas no solo argiloso relativamente ao solo de textura média /arenosa. A plasticidade diferente dos clones em função do tipo de solo sugere que o clone 8 tem a capacidade de suprir a demanda de água e nutrientes com menos raízes no solo argiloso (o que permite acumular mais carbono no tronco) enquanto o clone 12 não possui a capacidade de adaptar a alocação de C nas raízes em função da disponibilidade de água e nutrientes no solo.

Esses resultados são consistentes com as medições de respiração do solo feitas no projeto Eucflux, mostrando que a emissão de CO₂ na superfície do solo nas parcelas do clone 8 é bem menor no solo argiloso que no solo de textura média/arenosa, enquanto os valores nos dois tipos de solo para o clone 12 são semelhantes (comunicação pessoal, 2014)¹.

As densidades de raízes finas e as medições de respiração do solo indicam que os clones do híbrido *E. urograndis* podem ter uma plasticidade radicular diferente em função do tipo de solo. Uma menor alocação de carbono no solo de textura argilosa comparado ao solo de textura média/arenosa para o clone 8 poderia contribuir para explicar uma produção de biomassa de tronco maior no solo argiloso para este clone. A produção de biomassa foi semelhante nos 2 tipos de solos para o clone 12, o que poderia refletir em uma alocação de carbono no solo pouco sensível às texturas e em densidades de raízes finas semelhantes nos 2 tipos de solo para este clone.

4.3.5. Características morfológicas de raízes finas

A média e o coeficiente de variação (%), incluindo todas as profundidades amostradas até 17 metros, para o comprimento radicular específico (CRE), a área radicular específica (ARE) e para o diâmetro médio (Di) de raízes finas de cada material genético são mostrados na Tabela 6. Como aconteceu aos 2 anos de idade, esses parâmetros também não seguiram uma tendência clara ao longo do perfil do solo aos 4 anos, possuindo altos valores de coeficiente de variação. Isso também sugere que a amostragem de raízes na

¹ Dados fornecidos por Yann Nouvellon em reunião pessoal em Itatinga, em junho de 2014.

superfície do solo pode fornecer valores de CRE, ARE e Di que podem ser extrapolados para camadas mais profundas do solo.

Tabela 6: Média e coeficiente de variação (C.V.) para a área radicular específica (ARE), o comprimento radicular específico (CRE) e o diâmetro médio (Di) de raízes finas para cada material genético em cada tipo de solo (blocos 3 e 8) aos 4 anos de idade.

		M08 arenoso	M08 argiloso	M12 arenoso	M12 argiloso
ARE	Média (cm² g⁻¹)	186,3	238,9	202,7	285,6
	C.V. (%)	70	50	63	48
CRE	Média (m g⁻¹)	14,0	21,3	17,8	27,0
	C.V. (%)	74	63	78	57
Diâmetro	Média (mm)	0,3	0,3	0,3	0,3
	C.V. (%)	69	59	72	46

Aos 4 anos de idade do povoamento, o menor valor de CRE encontrado foi de 8,5 m g⁻¹ no clone 12 em solo com textura média/arenosa enquanto o maior foi de 55,6 m g⁻¹ também no clone 12, porém em solo com textura argilosa. Em geral, os maiores valores de CRE encontrados foram no solo com textura argilosa, principalmente no clone 12, em diferentes profundidades do perfil do solo (Figura 25).

Em relação à ARE, o menor e o maior valor foram encontrados no clone 12, em solo com textura argilosa, sendo de 73,3 cm² g⁻¹ e de 516,4 cm² g⁻¹, respectivamente. Também se observa que, assim como o CRE, os maiores valores de ARE foram encontrados no clone 12, no solo com textura argilosa, em diferentes camadas do solo (Figura 25).

De uma maneira geral, o diâmetro médio de raízes finas variou de 0,04 mm a 0,66 mm considerando todas as profundidades estudadas. O diâmetro médio variou aproximadamente de 0,4 mm na superfície a 0,6 mm até 2 m de profundidade. A partir daí, o diâmetro médio das raízes finas começa a diminuir gradativamente com a profundidade do solo, até atingir o menor valor, de 0,04 mm a 15 m de profundidade no clone 8 em solo de textura argilosa. O maior valor, de 0,66 mm, foi encontrado no clone 8 em solo de textura

média/arenosa a 11,5 m de profundidade, sendo uma exceção à tendência encontrada para esses dados.

No mesmo projeto Eucflux, em estudo realizado com o clone de *Eucalyptus grandis* aos 2 anos de idade, Lambais et al. (2012) encontraram que o Di de raízes finas foi ligeiramente maior no solo com textura média/arenosa (0,56 mm) do que no solo com textura argilosa (0,50 mm). Esses valores de Di corroboram com os resultados de Di encontrados nos diferentes materiais genéticos de eucalipto aos 2 anos de idade em solo de textura média/arenosa nesse estudo, cuja média foi de 0,5 mm (Tabela 4). Além disso, os valores de Di encontrados pelos mesmos autores variaram muito pouco em função da textura do solo, mesmo resultado obtido neste estudo, evidenciando que a textura do solo não influencia significativamente no Di de raízes finas de *Eucalyptus*.

Ao comparar apenas os valores médios do CRE, da ARE e do Di nas duas amostragens realizadas, aos 2 e 4 anos (Tabela 4 e Tabela 6), observa-se que os valores de todas essas variáveis sofreram redução com a idade. A média do Di diminuiu de 0,5 mm aos 2 anos a 0,3 mm aos 4 anos de idade; a média do CRE caiu de 24,3 m g⁻¹ para 20,0 m g⁻¹; já a média de ARE reduziu de 317,5 cm² g⁻¹ a 228,4 cm² g⁻¹.

López et al. (2001), em um estudo sobre a distribuição vertical de raízes finas por meio de minirhizotrons de um povoamento de 40 anos de *Quercus ilex*, encontraram valores do diâmetro médio de raízes finas que variaram de 0,19 a 0,29 mm nos primeiros 50 cm do solo, ou seja, menores que os valores encontrados no eucalipto com 4 anos de idade neste trabalho, os quais variaram de 0,32 a 0,47 mm considerando a mesma profundidade do solo.

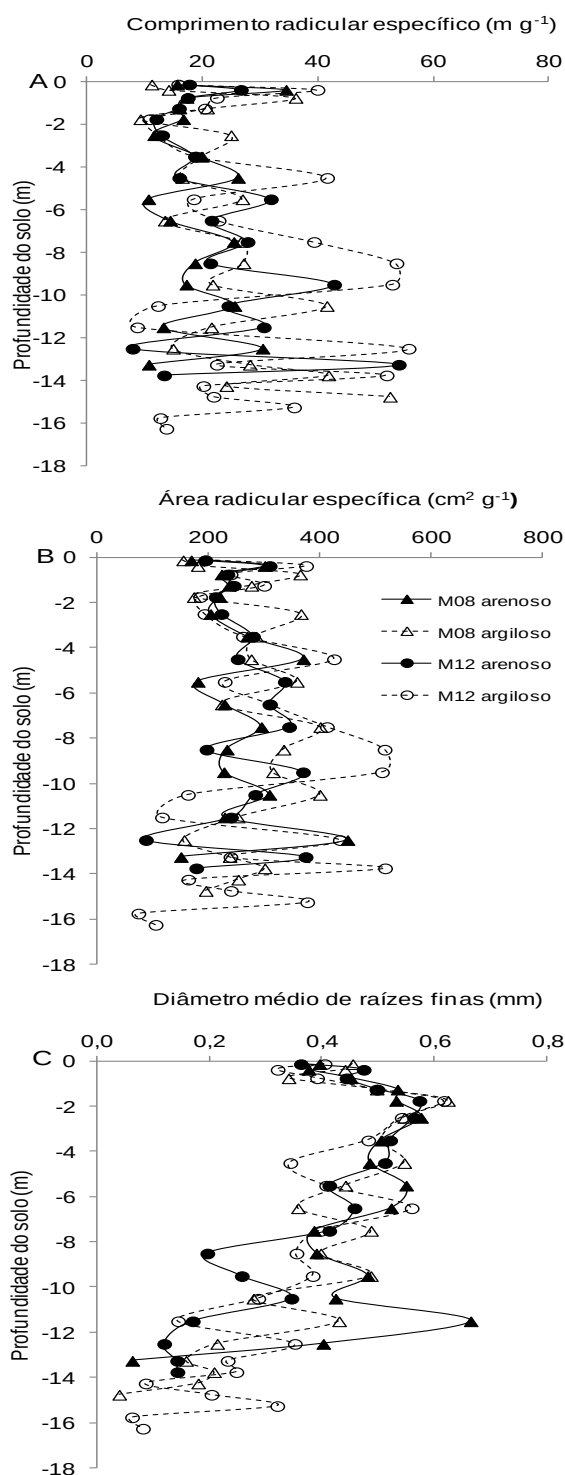


Figura 25: Mudanças no comprimento radicular específico A), na área radicular específica B), e no diâmetro médio C) de raízes finas com a profundidade do solo nos dois materiais genéticos de *Eucalyptus urograndis* aos 4 anos de idade em diferentes tipos de solo.

4.3.6. Massa total de raízes finas

A Figura 26 mostra que mais de 50% da massa de raízes finas dos dois materiais genéticos nos dois tipos de solo encontra-se até os 2 metros de profundidade. Mais especificamente, os dois clones de *E. urograndis* no solo com textura média/arenosa concentraram 65% de sua massa de raízes finas nesses primeiros 2 metros, enquanto o clone 8 possuiu 63% e o clone 12 possuiu 56% no solo com textura argilosa.

Até os 10 metros de profundidade, os dois materiais genéticos nos dois tipos de solo já possuíam mais de 90% da massa de raízes finas total. Foram encontradas raízes finas até os 15 metros de profundidade. Em geral, a proporção da massa de raízes finas total foi muito similar entre os dois materiais genéticos estudados nos dois tipos de solo.

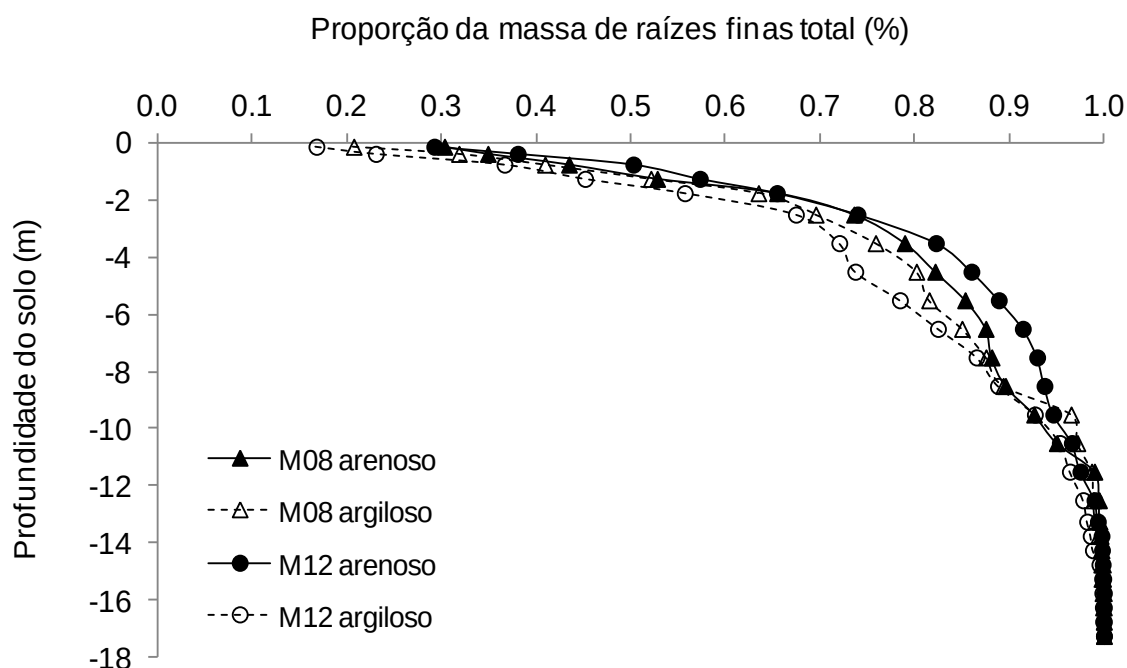


Figura 26: Proporção da massa de raízes finas acumulada até a profundidade máxima atingida aos 4 anos de idade nos dois clones de *Eucalyptus urograndis* (M08 e M12) nos solos de textura argilosa e média/arenosa.

Levando em consideração até 17,5 metros de profundidade, o clone 8 no solo com textura média/arenosa, aos 4 anos de idade, possuiu uma massa de raízes finas total de 6884 kg ha⁻¹ (Figura 27). Nas mesmas condições, porém em solo com textura argilosa,

o mesmo material genético teve uma massa de raízes finas total de 4101 kg ha^{-1} , ou seja, uma diferença de 2783 kg ha^{-1} (40%). Já o clone 12 possuiu valores de massa de raízes finas total de 6153 kg ha^{-1} em solo com textura média/arenosa e 5769 kg ha^{-1} em solo com textura argilosa (diferença de 6%). Este estudo mostrou um comportamento diferente dos dois clones em função da textura do solo. Enquanto o clone 8 teve uma alta plasticidade, conduzindo a uma massa de raízes finas menor no solo argiloso do que no solo com textura média/arenosa, a massa das raízes finas total do clone 12 foi muito semelhante nos dois tipos de solo.

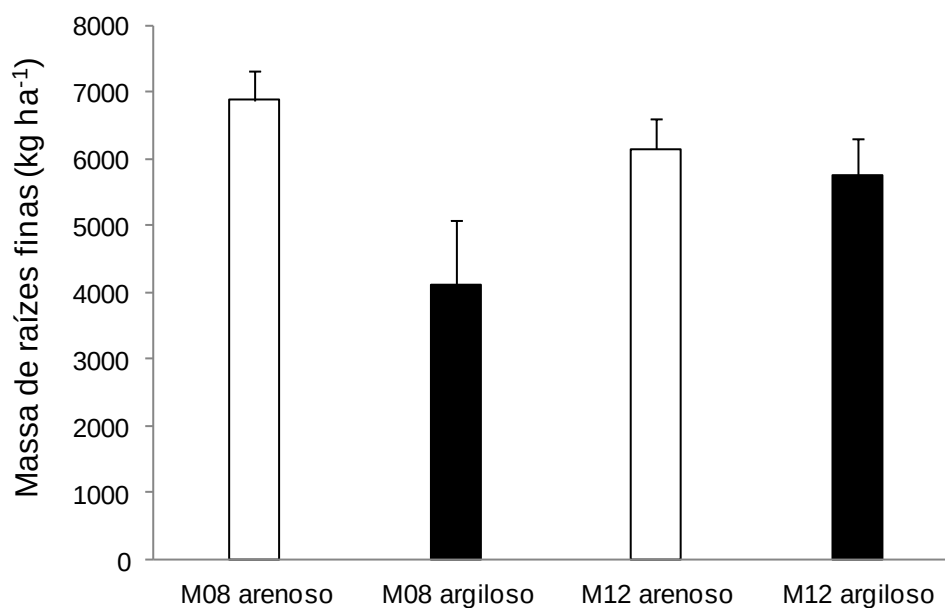


Figura 27: Massa de raízes finas total por hectare aos 4 anos de idade para os dois clones de *Eucalyptus urograndis* (M08 e M12) nos solos de textura argilosa e média/arenosa. As barras verticais representam os desvios padrões para cada tratamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo contribui para o entendimento da adaptação dos clones de eucalipto no atual contexto de mudanças climáticas globais. Um exemplo atual dessas mudanças é a escassez de água vivida por várias regiões do Brasil em 2014. Além de afetar a população, a falta de disponibilidade de água também afeta significativamente a produção e a produtividade de culturas anuais e de plantações de florestas, como as de eucalipto, chegando a causar a morte por um excessivo déficit hídrico. Isso gera impactos econômicos negativos para as empresas do setor florestal que, nesse caso, perdem milhões de metros cúbicos de madeira e geralmente recorrem à compra de madeira terceirizada a custos mais elevados.

Daí, torna-se necessário o investimento em pesquisa e tecnologia para a geração de materiais genéticos de eucalipto com características que os tornem mais resistentes a períodos de seca severa, aliadas a outros fatores como alta produtividade e resistência a doenças e pragas.

Este trabalho pôde mostrar que há diferença no desenvolvimento de raízes finas em camadas profundas, no Latossolo estudado (comum para plantios comerciais da espécie), entre diferentes materiais genéticos de eucalipto. Isso significa que determinado material genético de eucalipto é mais apto que outro para expandir suas raízes em profundidade e, assim, para explorar e absorver a água que contribui para seu desenvolvimento. Esta informação é uma ferramenta importante para o melhoramento genético dessa espécie na busca por um material resistente a um período de déficit hídrico acentuado em regiões tropicais.

Sua originalidade se dá principalmente pela realização de coletas de solo em camadas muito profundas, até atingir o lençol freático do sítio estudado (no caso até 17 metros de profundidade), permitindo constatar a presença de raízes finas de determinados materiais genéticos de eucalipto próximas ao lençol freático. Tudo isso sugere que o enraizamento em camadas profundas do solo deve ser considerado em modelos que visam prever o crescimento de plantios tropicais de eucalipto.

6. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou a rápida exploração do solo pelas raízes finas de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* usados em plantios comerciais no Brasil. Como esperado, a densidade de raízes finas aumentou com a idade do povoamento, principalmente na camada superficial do solo, mas também nas camadas muito profundas. A densidade de raízes finas foi maior na camada mais superficial do solo de textura média/arenosa do que no solo de textura argilosa para um clone estudado, porém não para o outro. Houve diferença entre os materiais genéticos de *Eucalyptus* em relação à profundidade máxima alcançada pelas raízes finas, ou seja, alguns materiais apresentaram raízes mais profundas que outros.

A alta variabilidade da relação IAF/IAR encontrada entre os materiais genéticos estudados provou que estes não seguem um padrão geral entre si, confirmando uma das hipóteses do trabalho. Além disso, os resultados indicaram que a textura do solo pode ter influência sobre a área radicular e a área foliar de um mesmo material genético.

A área total de raízes finas variou com o material genético e também com a textura do solo, uma vez que um dos clones, em ambos os tipos de solo, possuiu maior índice de área radicular em relação ao outro, o qual possuiu um índice de área radicular menor em solo argiloso e maior em solo mais arenoso.

As características morfológicas das raízes finas não seguiram uma tendência clara ao longo do perfil do solo para todos os materiais genéticos, o que sugere que a amostragem de raízes na superfície pode fornecer valores de comprimento radicular específico, área radicular específica e diâmetro médio que podem ser extrapolados em camadas mais profundas do solo, cuja amostragem é muito mais difícil. Tal informação faz rejeitar uma das hipóteses iniciais do trabalho, de que o comprimento e a área radicular

específicos diminuem com a idade do povoamento de espécies de eucalipto, ao passo que o diâmetro médio aumenta, ou vice-versa.

Já a relação altura/profundidade máxima encontrada parece ser válida aos 2 anos de idade, mas não aos 4 anos de idade, visto que as raízes finas do material genético de eucalipto estudado já atingiram o nível do lençol freático no solo, enquanto as árvores seguem crescendo em altura.

Alguns materiais tiveram uma capacidade maior que outros para explorar e absorver água e nutrientes em camadas mais profundas do solo e, conseqüentemente possuem maior aptidão para serem plantados em regiões com maior déficit hídrico. Espera-se que este estudo possa contribuir para o melhor entendimento da dinâmica de raízes finas de diferentes materiais genéticos de eucalipto em Latossolos profundos, auxiliando em programas de melhoramento genético e evidenciando sua importância para os modelos ecofisiológicos. Contudo, ressalta-se a importância de realizar mais trabalhos que estudem a dinâmica de raízes finas em profundidade, tanto para o eucalipto como para outras espécies florestais, a fim de aprimorar e confirmar os dados já existentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas). **Anuário Estatístico da ABRAF 2013, ano base 2012**. ABRAF: Brasília, 130 p., 2013.

AL ALFAS, N. et al. Growth and production of a short-rotation coppice culture of poplar – IV: Fine root characteristics of five poplar clones. **Biomass & Bioenergy**, v. 32, p. 494-502, 2008.

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast- growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v.193, p. 179-195, 2004.

BATTIE-LACLAU, P. et al. Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. **Plant and Soil**, v. 371, n. 1-2, p. 19-35, 2013.

BAUHUS, J.; BARTSCH, N. Fine-root growth in beech (*Fagus sylvatica*) forest gaps. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 26, p. 2153–2159, 1996.

CABRAL, O. R. M. et al. Fluxes of CO₂ above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 49-59, 2011.

CAMPOE, O. C. et al. Stand-level patterns of carbon fluxes and partitioning in a Eucalyptus grandis plantation across a gradient of productivity, in Sao Paulo State, Brazil. **Tree Physiology**, v. 32, p. 696-706, 2012.

CAMPOE, O. C. et al. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 14-20, jan. 2013.

CHRISTINA, M. et al. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, v. 2(3), n. 27, mar. 2011.

HAJEK, P.; HERTEL, D.; LEUSCHNER, C. Intraspecific variation in root and leaf traits and leaf-root trait linkages in eight aspen demes (*Populus tremula* and *P. tremuloides*). **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 415, out. 2013.

IVERSEN, C. M. Digging deeper: fine-root responses to rising atmospheric CO₂ in forested ecosystems. **New Phytologist**, v. 186, p. 346-357, 2010.

JACKSON, R. B. ; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E.-D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 94, p. 7362-7366, jul. 1997.

JOURDAN, C. et al. Fine root production and *turnover* in Brazilian *Eucalyptus* plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 396-404, 2008.

KLEIDON, A.; HEIMANN, M. Assessing the role of deep rooted vegetation in the climate system with model simulations: mechanism, comparison to observations and implications for Amazonian deforestation. **Climate Dynamics**, v. 16, p. 183-199, 2000.

LACLAU, J.-P. et al. Spatial distribution of *Eucalyptus* roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. **Tree Physiology**, v. 21, p. 129-136, 2001.

LACLAU, J.-P. et al. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. **Tree Physiology**, v. 29, p. 111-124, 2009.

LACLAU, J.-P. et al. Mixing *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. **Oecologia**, 2012.

LACLAU, J.-P. et al. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 243, jul. 2013.

LAMBAIS, G. R. et al. Densidade de raízes finas em *Eucalyptus grandis* cultivados em Latossolos com texturas diferentes através de um gradiente de profundidade. In: FERTBIO 2012, XXX, 2012, Maceió. **A responsabilidade socioambiental de pesquisa agrícola**. Maceió: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.

LE MAIRE, G. et al. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of *Eucalyptus* plantations. **Remote Sense of Environment**, 14p., 2010.

LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; GRACIA, C. A. Vertical distribution of fine root density, length density, area index and mean diameter in a *Quercus ilex* forest. **Tree Physiology**, v. 21, p. 555-560, 2001.

MA, L. et al. Effects of drip irrigation on deep root distribution, rooting depth, and soil water profile of jujube in a semiarid region. **Plant Soil**, v. 373, p. 995-1006, ago. 2013.

MAEGHT, J.-L.; REWALD, B.; PIERRET, A. How to study deep roots – and why it matters. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 299, ago. 2013.

MAGNANI, F.; GRACE, J.; BORGHETTI, M. Adjustment of tree structure in response to the environment under hydraulic constraints. **Functional Ecology**, v.16, p. 385–393, 2002.

MARSDEN, C. et al. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of *Eucalyptus* plantation growth on deep tropical soils. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 112-128, ago. 2013.

MATAMALA, R.; STOVER, D. B. Introduction to a Virtual Special Issue: modeling the hidden half – the root of our problem. **New Phytologist**, v. 200, p. 939-942, 2013.

MAURICE, J. et al. Fine root isotropy in *Eucalyptus grandis* plantations. Towards the prediction of root length densities from root counts on trench walls. **Plant Soil**, v. 334, p. 261-275, abr. 2010.

MEINEN, C.; HERTEL, D.; LEUSCHNER, C. Biomass and morphology of fine roots in temperate broad-leaved forests differing in tree species diversity: is there evidence of below-ground overyielding? **Oecologia**, v. 161, p. 99-111, maio 2009.

MENDHAM, D.S. et al. Soil water depletion and replenishment during first- and early second-rotation *Eucalyptus globulus* plantations with deep soil profiles. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 151, p. 1568–1579, 2011.

MISRA, R. K. et al. Below and above-ground growth of *E. nitens* in a young plantation. I. Biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 106, p. 283-293, 1998.

NEPSTAD, D. C. et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, v. 372, 1994.

NOGUCHI, K.; NAGAKURA, J.; KANEKO, S. Biomass and morphology of fine roots of sugi (*Cryptomeria japonica*) after 3 years of nitrogen fertilization. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 347, set. 2013.

NOUVELLON, Y. et al. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. **Tree Physiology**, v. 32, p. 680-695, 2012.

O'GRADY A. P.; WORLEDGE, D.; BATTAGLIA, M. Temporal and spatial changes in fine root distributions in a young *Eucalyptus globulus* stand in southern Tasmania. **Forest Ecology and Management**, v. 214, p. 373–383, 2005.

O'GRADY, A. P.; WORLEDGE, D.; BATTAGLIA, M. Above- and below-ground relationships, with particular reference to fine roots, in a young *Eucalyptus globulus* (Labill.) stand in southern Tasmania. **Trees**, v. 20, n. 5, p. 531-538, 2006.

OSTONEN, I. et al. Specific root length as an indicator of environmental change. **Plant Biosystems**, v. 141, n. 3, p. 426-442, nov. 2007.

PERSSE, H. Methods of studying root dynamics in relation to nutrient cycling. In: HARRISON, A. F.; INESON, P.; HEAL, O. W. **Nutrient cycling in terrestrial ecosystems: Field methods, application and interpretation**. Londres, Nova Iorque: Elsevier Applied Science, 1990, p. 198-217.

RESH, S. C. et al. Coarse root biomass for Eucalypt plantations in Tasmania, Australia: sources of variation and methods of assessment. **Trees**, v.17, n. 5, p. 389-399, 2003.

ROBINSON, N.; HARPER, N. J.; SMETTEM, K. R. J. Soil water depletion by Eucalyptus spp. integrated into dryland agricultural systems. **Plant Soil**, v. 286, p. 141-151, 2006.

ROSENVALD, K. et al. Tree age effect on fine-root and leaf morphology in a silver birch forest chronosequence. **European Journal of Forest Research**, v. 132, p. 219-230, 2013.

SALESKA, S. R. et al. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, n. 5850, p. 612, 2007.

SCHENK, H. J.; JACKSON, R. B. Rooting depths, lateral roots spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. **Journal of Ecology**, v. 90, n. 3, p. 480-494, 2002.

SCHWINNING, S. The ecohydrology of roots in rocks. **Ecohydrology**, v. 245, p. 238-245, 2010.

SILVA, E. V. et al. Dynamics of fine root distribution after establishment of monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. **Plant Soil**, v.325, p. 305-318, 2009.

SILVA, E. V. et al. Functional specialization of *Eucalyptus* fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracer at varying soil depths. **Functional Ecology**, v. 25, n. 5 996-1006, 2011.

STAPE, J.L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.-P. Quantificação dos balanços carbono, água e nutrientes na escala do ecossistema, para uma rotação do Eucalipto usando torre de fluxo: testar modelos ecofisiológicos e melhorar as práticas silviculturais. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 179, p. 4, 2005.

THONGO M'BOU, A. et al. Root elongation in tropical Eucalyptus plantations: effect of soil water content. **Annals of Forest Science**, v. 65, n. 6, p. 609, 2008.

VOGT, K. A.; VOGT, D. J. ; BLOOMFIELD, J. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. **Plant Soil**, v. 200, p. 71-89, 1998.

ZHANG, Y.; XIE, Y. S. ; HAO, M. D. Study on characteristics of apple orchard soil moisture in gully region of Loess Plateau. **Soils**, v. 43, n.2, p. 293-298, 2011.